

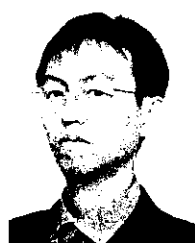
The Latest Technologies for Process Control in Hot Rolling Mill



浦野 朗

Akira Urano

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(課長)



岡田 誠康

Masayasu Okada

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(掛長)



柳野 公治

Kouji Yanagino

千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(主席掛長)

要旨

熱間圧延におけるプロセス制御技術の中で、ホットストリップミル工場仕上圧延で近年開発した技術を紹介する。プレビュー AGC は予見制御理論の現場適用を行ったもので、外乱をあらかじめ考慮し、アクチュエータの性能範囲内で安定して板厚精度の良い板圧延を可能としたスケジュールフリー化技術は、オンラインロールプロファイルメータによりロール磨耗状況を把握し、その情報をもとにオンラインロールグラインダーにて研削するものであり、ロール研削精度が向上し、幅スケジュール制約が大幅に緩和できた。

Synopsis:

The most recently developed control technologies in a hot strip mill are described. Preview AGC has been developed with a preview control synthesis. It controls roll gaps by using the previous information of disturbances. The disturbances which are concerned are derived from the rolling force, the roll gap and the thickness of a previous stand. The thickness accuracy and the availability of mill have been improved by this technology. An on-line roll grinding (ORG) system with an on-line roll profile meter (OPM) has been developed for the purpose of achieving schedule-free rolling. The ORG smooths the worn and roughed surface of a work roll and OPM can measure the profile of a revolving roll without contact. The data obtained by the OPM are given as feedback information to the ORG. As a result, grinding accuracy has been improved and rolling restriction on width has been relaxed widely.

1 緒 言

鋼材の熱間圧延設備は製鉄工場から供給される素材を再加熱する加熱炉、加熱後の素材を目標寸法まで加工する圧延機、圧延後の鋼材を目標材質にするためのオンライン冷却設備、切断、検査など製品に仕上げるための精整設備からなっている。また、工場は厚鋼板、薄鋼板、形鋼、線材、棒鋼といった製品ごとに分かれている。それぞれの工場では、省エネルギーを目的とした加熱炉燃焼制御、ミルでの寸法品質向上を目的としたセットアップ制御や自動寸法制御、材質向上を目的とした冷却制御、および工場全体の生産性向上のための最適化制御などが行われている。

熱間圧延では製鉄所の製品の過半数が処理され、同時に製品品質に大きく影響する重要なプロセスである。また、このプロセスにおける原単位、歩留りが、製品の製造コストに大きく影響する。近年の製品品質についての厳しい要求、あるいは操業形態の多様化に対応して、熱間圧延における制御技術にも多くの開発、改善が実行されてきた。

本報では、これら多くの制御技術の中から最近開発されたホットストリップ仕上ミルでの、板厚制御技術とスケジュールフリー化技

術を紹介する。

2 新制御技術開発の背景

ホットストリップミル工場（以下、熱間圧延工場）は、連続鋳造工場より供給される 250 mm 厚程度の素材（スラブ）を、連続加熱炉にて再加熱し、粗圧延機群にて 40 mm 厚程度の中間素材（シートバー）に圧延し、さらに仕上圧延機群にて製品厚まで圧延後、水冷ゾーンにて冷却し、コイラーにて巻き取り、精整後出荷するプロセスである。この中で仕上圧延は 7 台の圧延機群にてタンデム状態で圧延を行う複雑なプロセスであり、かつ製品の品質決定上重要な設備である。

仕上圧延で製品品質や製品歩留りを決定する最も重要な操業指標の一つが板厚精度である。これまでに油圧圧下装置¹⁾、スタンド間板厚計²⁾、高速制御計算機システムなどの導入³⁾を行い、精度向上に努めてきた。直近では水島製鉄所熱間圧延工場にてプレビュー AGC (automatic gauge control) を開発し、高精度板厚製品の安定生産を達成した。

一方、仕上圧延を中心に、近年スケジュールフリー化に関するさまざまな技術開発が行われている。従来、板幅の広いコイルから狭いコイルの順（コフィンスケジュール）で圧延を実施していたが、再加熱時の省エネルギーのためのホットチャージ操業では、そのよ

*平成11年7月29日原稿受付

うな制約をできる限り外し、スラブを連続鋳造での鋳込み順に近い順で加熱炉に装入することにより、温度低下の防止を図ることが重要である。このため板幅の規制を排除した、いわゆる幅張り圧延などのスケジュールフリー化のための技術開発を行ってきた。千葉製鉄所第3熱間圧延工場においてもスケジュールフリーの拡大を目指し、オンラインロールプロファイルメータ (OPM)⁹⁾ およびオンラインロールグラインダー (ORG)⁹⁾ を用いたスケジュールフリー化技術を開発した。

3 プレビュー AGC

従来、仕上ミル板厚制御では、通板前に温度・荷重・板厚モデルに基づいて圧下位置などの初期設定を行うセットアップ制御、先端通板途中にスタンド間板厚計などの情報に基づき初期設定を修正するダイナミックセットアップ、先端通板後に計算板厚を目標に近づけるべく圧下を動作させる絶対値 AGC、計算板厚と実測板厚の誤差に基づき補正を行うモニター AGC を実施していた。さらに、AGC での圧下変動とマスフロー変動を協調して制御する多変数制御¹⁰⁻¹³⁾ を行っている。

板先端部は板中央部に比べ、加熱炉での加熱特性や粗ミルでの冷却特性が異なり、温度変動が大きい上にセットアップモデル誤差もあり、板厚制御上の外乱が大きい。水島製鉄所熱間圧延工場では油圧圧下が後段3スタンドにしかないため、圧下や速度アクチュエータの応答速度限界により、先端板厚変動を制御仕切れない場合があった。このため、予見制御理論¹⁴⁾ を取り入れたプレビュー AGC を開発した。

プレビュー AGC は、上流スタンドでの圧延荷重など材料の柔らかさの実績やスタンド間板厚計実績値から外乱の今後の変化を予測し、その変化の中で制御結果が最適となるように圧下位置を制御する技術である。これにより外乱の大きな板先端部での板厚制御性を向上させることができた。

3.1 プレビュー AGC の設計

本制御は Fig. 1 に示すように、前スタンド実績とスタンド間板厚計実績をトラッキングしたデータから計算する予見フィードフォワード部と、当該スタンド板厚実績から計算する最適フィードバック部から構成される。ここで、予見フィードフォワード部が従来のダイナミックセットアップに対応する機能、最適フィードバック部が AGC に対応する機能と考えられる。

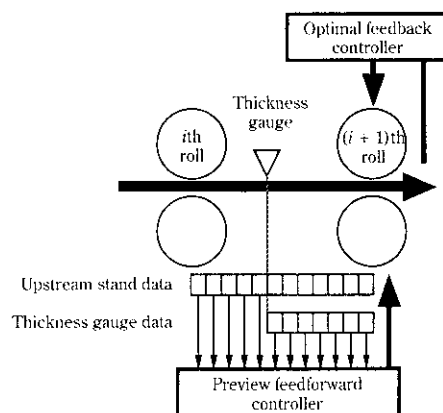


Fig. 1 Configuration of preview AGC

本制御の設計方法を Fig. 2 のブロック図に従い示す。まず、圧延プロセスを次のような状態方程式で表わす。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

また、誤差信号を

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (3)$$

と定義する。ここで、 x は圧延プロセスの状態変数、 y は出力変数、 u は操作量、 d は外乱、 k は時間ステップ、 A, B, C, E は圧延プロセスの特性を示す行列、 r は目標をそれぞれ表わす。ただし、プレビュー AGC では $r(k)$ は一定である。また、次のエラーシステムを導入する。

$$\begin{bmatrix} e(k+1) \\ \Delta x(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Im & -CA \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ \Delta x(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -CB \\ B \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} -CE \\ E \end{bmatrix} \Delta d(k) \quad (4)$$

次に、(4) 式は (5) 式のように書きかえることができる。ただし、(4) 式と (5) 式の項はそれぞれの項に対応している。

$$Xo(k+1) = \Phi Xo(k) + G \Delta u(k) + Gd \Delta d(k) \quad (5)$$

(5) 式のエラーシステムに対して、現在時刻から Md ステップ未来までの外乱が既知であるとして、次の誤差項と入力項を含む 2 次評価関数を定義する。

$$J = \sum_{k=0}^{Md} [Xo(k)^T Q Xo(k) + \Delta u(k)^T H \Delta u(k)] \quad (6)$$

ただし、(6) 式の Q, H は、それぞれ半正定行列、正定行列となる設計者の定めるべき重み行列である。このとき、(6) 式を最小化する制御入力 $\Delta u(k)$ は、

$$\Delta u(k) = Fo Xo(k) + \sum_{j=0}^{Md} Fd(j) \Delta d(k+j) \quad (7)$$

となる。ただし、

$$Fo = -[H + G^T P G]^{-1} G^T P \Phi \quad (8)$$

$$Fd(j) = -[H + G^T P G]^{-1} G^T (\xi^T)^j P G d \quad (j \geq 0) \quad (9)$$

$$\xi = \Phi + G Fo \quad (10)$$

であり、 P は次のリカッチ方程式

$$P = Q + \Phi^T P \Phi - \Phi^T P G [H + G^T P G]^{-1} G^T P \Phi \quad (11)$$

の解である。したがって、プレビュー AGC の操作量 $u(k)$ は、

$$Fo = [Fe \quad Fx] \quad (12)$$

とおくと、

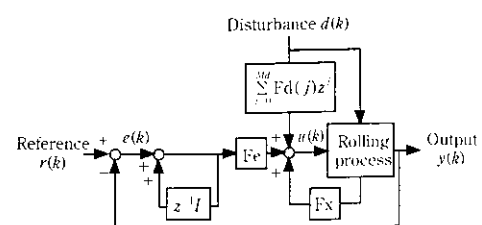


Fig. 2 Block diagram of preview AGC

$$u(k) = Fe \sum_{i=1}^k e(i) + Fx(k) + \sum_{j=0}^{Md} Fd(j) \Delta d(k+j) \dots\dots (13)$$

となる。ここで、Fe は出力フィードバックゲイン、Fx は状態フィードバックゲイン、Fd は予見フィードフォワードゲインとなる。

3.2 シミュレーションによる評価

実機適用前にシミュレーションにてパラメータ調整と効果確認を行った。一例として、板厚ステップ外乱に対する絶対値 AGC とプレビュー AGC の応答の比較を Fig. 3 に示す。絶対値 AGC では外乱到達後制御誤差が発生してから修正動作を行っている。プレビュー AGC では、外乱到達前にその影響を最小限にとどめるように逆側に偏差が出る操作を行い、外乱到達後にさらに操作する制御を行っている。このため、目標からの最大偏差を絶対値 AGC に比べ約 1/2 に押さえることができる。

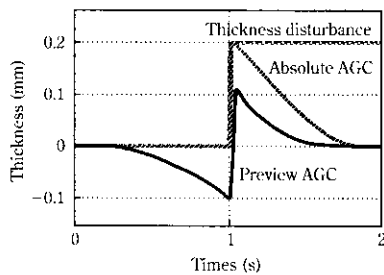


Fig. 3 Simulation of response to step thickness disturbance

Table 1 Comparison of thickness control methods

	Toward offset disturbance	Toward disturbance along strip length
Absolute AGC	○	△
Feedforward AGC	△	○
Preview AGC	○	◎

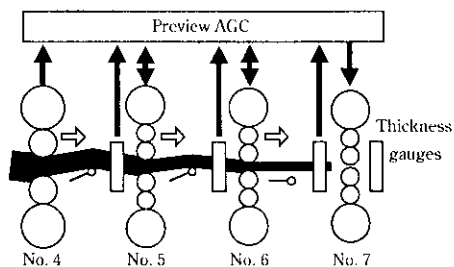


Fig. 4 Diagram of preview AGC system

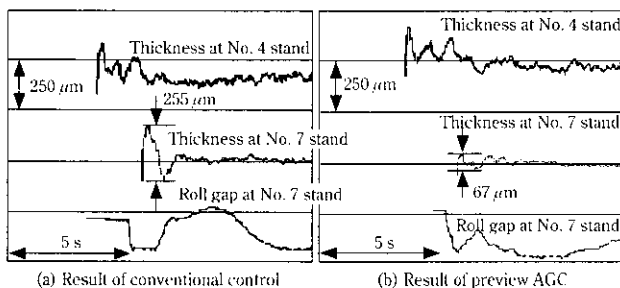


Fig. 5 Comparison of actual rolling data between conventional control and preview AGC

従来型のフィードフォワード制御を含めてシミュレーションした結果、Table 1 に示すようにいずれの外乱に対してもプレビュー AGC の性能が優れていた。

3.3 実機適用結果

水島製鉄所熱間圧延工場仕上ミルの油圧圧下が導入されている No. 5~7 スタンドに、Fig. 4 に示す方式で本制御を適用した。No. 4 スタンド出側での板厚変動が同じような 2 つの材料に対して、従来型の板厚計ダイナミックセットアップと絶対値 AGC による制御、およびプレビュー AGC をそれぞれ実施した結果を Fig. 5 に示す。従来型制御では外乱の影響を大きく受け、No. 7 スタンドでも先端板厚変動が残っているが、プレビュー AGC では外乱に備えて事前に圧下を動作させることにより、大きく改善できている。

新しく開発した制御技術により先端部の制御性が改善でき、通板性を考慮しつつ、品質の良い製品を圧延することが可能となった。この新制御方式は、月間ミル作業率 96.8%、およびミスロールゼロ連続 110 日間の日本記録樹立¹⁵⁾ に大きく寄与した。

4 OPM と ORG を用いたスケジュールフリー化技術

ホットストリップミルにおけるスケジュールフリー化の阻害要因の 1 つに、圧延中に成長したロールの摩耗段差が板に転写することにより、板プロフィール異常が発生することが挙げられる。この問題を解決する手段として、オンラインでロールの表面を研削し平滑化することが有効と考えられ、OPM および ORG を導入した。この設備は、コイル圧延中に OPM で計測したロールのプロフィールをもとに摩耗段差の位置と量を把握し、検出した摩耗段差を ORG で研削し取り除こうとするものである（以下フィードバック研削）。これにより圧延中のワークロール表面を常に健全な状態にすることが可能となり、スケジュールフリー圧延の拡大を達成した。

4.1 OPM および ORG 設備

Fig. 6 に OPM、ORG 設備の鳥瞰図を示す。これらの設備はロール摩耗自体と板プロフィールへの影響の大きさから後段の 4~7 スタンド入側に設置した。各スタンドとも上/下、左/右の計 4 個の OPM ヘッド、ORG 砥石を有する。

Fig. 7 に OPM 装置の模式図を示す。測定は 3 個の超音波距離計

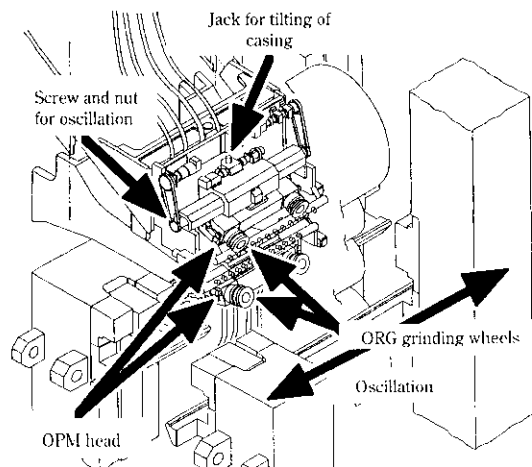


Fig. 6 Bird's eye view of OPM/ORG equipment

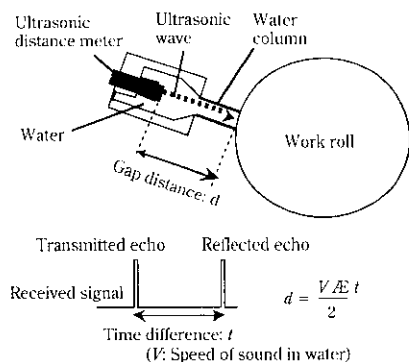


Fig. 7 OPM device and principle of measurement

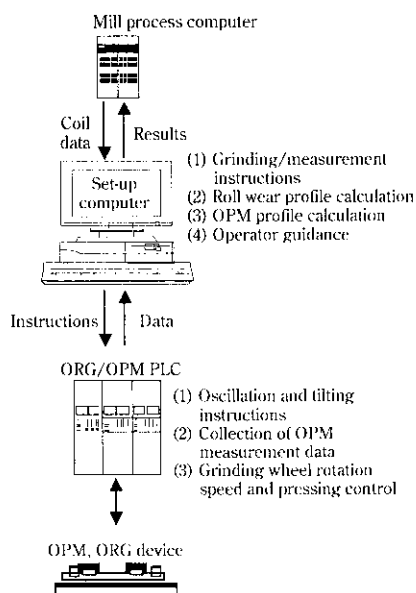


Fig. 8 System configuration of roll profile control

で構成される2つの測定ヘッドをロール軸方向にオシレートすることにより行う。各距離計には高温、水飛散、振動などの悪環境に強い水柱式超音波距離計を採用し、発信エコーと反射エコーの時間差からワークロールまでの距離を測定する。さらに、新しく水温補正¹⁶⁻¹⁹⁾および信号処理方法を開発することにより、圧延中においても μm オーダーのロールプロフィール計測精度を実現した。

ORG設備には2組のカップ型CBN (cubic boron nitride) 砥石を取り付けてあり、ロールと砥石の相対滑りによりロール研削を行う。また、ロールの軸方向にオシレートしながら回転した砥石を所定の位置でロールに押しつけることで、任意の位置のロール研削が可能となる。本ORG装置は砥石を油圧モーターにより強制的に回転させる駆動型であることが特徴であり、従来にはない高い研削能力と設備の小型化を両立した。

これらの設備を制御するシステムはFig. 8に示すように、コイル情報を決定するミルP/C (process computer)、OPM計測やORG研削の指令を行うセットアップ計算機 (パソコン)、アクチュエータを制御する各スタンドごとのPLC (programmable logic controller) から構成される。これらのシステムを用いて、あらかじめ指定したコイル本数ごとにOPM測定を行い、測定結果をもとにワークロールの摩耗段差の位置と量を認識し、この摩耗段差を取り除くようORGを制御することによりフィードバック研削を行う。

Table 2 Accuracy of OPM measurements

Condition		Accuracy (μm)
Off-line measurement (at low temperature)	Sensor unit measurement	± 2
	Wear level difference measurement	± 8
	Total profile measurement	± 15
On-line measurement (at high temperature)	Wear level difference measurement	$-15 \sim 5$

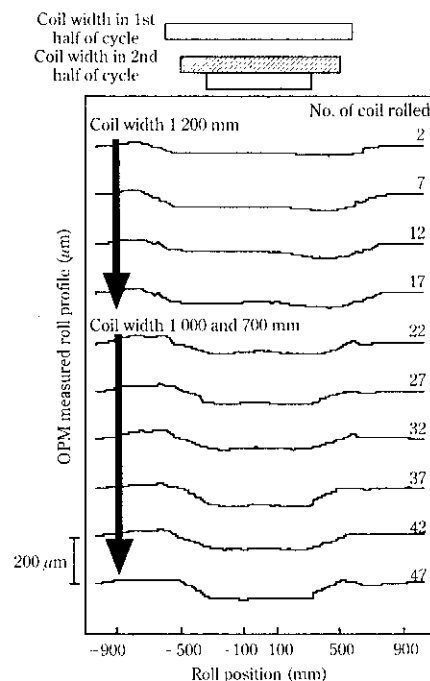


Fig. 9 Roll profile during grinding with feedback control

4.2 OPM 測定精度

Table 2 に OPM 測定精度を示す。冷間の実験において、摩耗段差に対して $\pm 8 \mu\text{m}$ 、ロール全体プロフィールに対してロール中央で $\pm 15 \mu\text{m}$ の測定精度を得た。また実機で圧延中に計測した摩耗段差量とロールショップでの計測結果を比較した結果、 $-15 \sim 5 \mu\text{m}$ の誤差であった。これはサーマルクラウンなども影響していると考えられるが、フィードバック研削を実施するには十分な精度であると判断できる。

4.3 フィードバック研削適用結果

Fig. 9 にフィードバック研削実施時に OPM で測定したロールプロフィールの例を示す。この例において、サイクル前半は 1200 mm の同一幅圧延であり、サイクル後半はコイル幅 1000 mm と 700 mm の異幅交互圧延である。図より、サイクル前半の同一幅圧延時に摩耗段差が ORG 研削により除去されていること、サイクル後半の異幅交互圧延時も摩耗段差の成長を抑止できていることがわかる。また、このときの板プロフィールについても特に問題は発生しなかった。さらに、圧延後オフラインでロールプロフィールを測定したところ摩耗段差はなく良好な結果であった。これらのことにより、本システムの有効性が確認された。

同一幅圧延時ならびに異幅交互圧延時における本制御システムの有効性を確認しながら順次工程化を実施し、現在では4~7の全スタンド、全鋼種に対して本制御を適用している。本制御システムではOPMを導入したことによりロール研削精度が向上し、従来問題となっていた幅スケジュール制約は飛躍的に改善され、生産性向上、製品品質向上に大きく寄与した。

5 結 言

熱間圧延におけるプロセス制御の最近の開発事例として、ホットストリップ仕上ミルにおけるプレビューAGCとスケジュールフリー

化技術を紹介した。その内容を以下に概括する。

- (1) 予見制御理論を適用したプレビューAGCを開発、実用化し、良好な板厚制御結果を得た。
- (2) プレビューAGCにより、大きな外乱に対しても、限られたアクチュエータ能力範囲内で安定した制御が達成できた。
- (3) OPM測定情報をもとにORGにてロール研削を行うシステムを導入し、飛躍的なスケジュールフリー化を達成した。
- (4) OPMの冷間精度は $\pm 15\mu\text{m}$ と良好で、かつ、厳しい環境下でも安定して測定できる。
- (5) OPM情報にもとづく精度の良いオンラインロール研削が可能となった。

参 考 文 献

- 1) 直井孝之, 柴田克巳, 浜田圭一, 梅本純生, 広瀬勇次, 三宅祐史: 鉄と鋼, **70**(1984)5, 126
- 2) 高木 清, 内藤 康, 浜田 一明, 浜田圭一, 渡辺敏雄, 中野貞則: 鉄と鋼, **70**(1984)5, 127
- 3) 奥田隆康, 石川好蔵, 上井克彦, 高木 清, 春日弘夫, 田辺 護: 鉄と鋼, **70**(1984)5, 128
- 4) 小関智史, 吉田 博, 上村正樹, 藤本隆史, 上原淳則: *CAMP-ISIJ*, **5**(1992), 1514
- 5) 上原淳則, 村山 薫, 上村正樹, 池田晴行, 岡田公之, 二階堂英幸: *CAMP-ISIJ*, **5**(1992), 1515
- 6) 上村正樹, 藤本隆史, 上原淳則, 村山 薫, 吉田 博, 小関智史: *CAMP-ISIJ*, **5**(1992), 1516
- 7) 浦野 朗, 村山 薫, 潮海弘資: 川崎製鉄技報, **26**(1994)1, 33
- 8) 林 寛治, 島筒博章, 西崎純一: 三菱重工技報, **29**(1992), 13-17
- 9) 山本国雄, 林 寛治, 塚本顕彦, 江川庸夫, 後藤崇之: 三菱重工技報, **25**(1988), 352-356
- 10) Y. Nishikawa, M. Araki, T. Fujinaka, M. Amano, J. Yamasaki, and A. Urano: "Advanced Control in Hot Strip Finishing Mill", IFAC Symp. of Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, (1986)
- 11) M. Okada, Y. Iwasaki, K. Murayama, A. Urano, A. Kawano, and H. Shiomi: "Optimal Control System for Hot Strip Finishing Mill", IFAC96, (1996)
- 12) 岡田誠康, 岩崎嘉徳, 村山 薫, 浦野 朗, 河野晃彦, 潮海弘資: 「熱延仕上ミル協調制御」, 第4回制御技術シンポジウム, 計測自動制御学会, (1996)
- 13) 岡田誠康, 岩崎嘉徳, 村山 薫, 浦野 朗, 河野晃彦, 潮海弘資: 「熱延仕上ミル協調制御」, 第3回フォーラム「鉄鋼プロセスの制御モデル」, 日本鉄鋼協会計測制御システム工学部会, (1996)
- 14) 上谷武上, 江上 正: 「デジタル予見制御」, (1992), [産業図書]
- 15) 今井卓雄: ふぉらむ, **4**(1999)5, 271
- 16) 柳野公治, 山本克史, 高島典生, 鈴木 真, 松村賢司, 奥野 真: *CAMP-ISIJ*, **11**(1998), 987
- 17) 市川文彦, 奥野 真, 河合義人, 多木俊男: *CAMP-ISIJ*, **2**(1989), 1543
- 18) 奥野 真, 市川文彦, 石川 孝, 武智敏貞: *CAMP-ISIJ*, **2**(1989), 1544
- 19) 市川文彦, 奥野 真, 石川 孝, 武智敏貞: 鉄と鋼, **79**(1993), 62-69