一般化予測制御型 STC による連続溶融亜鉛メッキライン 加熱炉の最適板温制御

長谷川 明 彦*

Optimal Strip Temperature Control of Heating Furnace of Continuous
Galvanizing Line Using the Self Tuning Generalized Predictive Control

Akihiko HASEGAWA*

The strip temperature dynamics of the heating furnace of Continuous Galvanizing Line (CGL) consists of dead-time and time lag against the change of various plant variables. The exact identification of these characteristics is difficult because the dynamics is time-varying depending upon operational conditions and long-term shifts of plant characteristics. In view of these facts, the author applied the Self-Tuning Generalized Predictive Control to the strip temperature control of the heating furnace and obtained fine control performance, and established a new strip temperature control for the heating furnace of CGL or CAPL (Continuous Annealing and Processing Line). This control has been successfully applied at No. 5 CGL in Nagoya Works of Nippon Steel Corporation and the basic idea of the control is transferred to No. 2 CAPL in Nagoya Works and No. 2 CAPL in Kimitsu Works.

Key Words: generalized predictive control, self-tuning control, identification, time-varying process

1. はじめに

連続溶融亜鉛メッキライン (CGL) は、冷間圧延後の薄鋼帯 (ストリップ) を連続的に焼鈍し、亜鉛メッキを行うラインである。CGL では、プロセスコンピュータを用いて板温制御 (ストリップ温度の時間的経過が所定のパターンとなるように制御する) をはじめとして各種の制御を行っている。板温制御は、加熱炉、均熱炉などの各炉で行われるが、なかでも加熱炉

の板温制御は、焼鈍の最高温度を規定し、生産性やストリップ品質に大きく影響するという点で重要な制御である。一方、加熱炉は一般にむだ時間や時間遅れの特性をもち、それらの動特性が操業条件により変化するために厳密に動特性を同定するのは困難であり、かつ経時的な変化が想定される不確かさをもったプロセスである。

本報告では、上記のようなむだ時間やモデル次数の変化などの不確かさをもったプロセスに対して適応性、ロバスト性の高いことが期待される一般化予測制御型 STC (Self Tuning Control) を実炉に適用してその有用性を確認し、新しい板温制御方法を確認したので以下に述べる。

なお、本報告で述べる最適板温制御は弊社名古屋製鐵所の No. 5 CGL に適用され現在順調に稼動中である。

2. プロセスの概要および加熱炉動特性のモデリング

2.1 プロセスの概要

No. 5 CGL の全体図を Fig. 1 を示す。本ラインにて焼鈍されるストリップは冷間圧延^(注1)後のコイルであり、ペイオフリールにまず装着される。このコイルの先端が、現在通板中のコイルの尾端と溶接機で溶接されることにより、連続的な通板、焼鈍および亜鉛メッキが行われる。亜鉛メッキ完了後のコイルはテンションリールで巻き取られ、所定の長さで切断される。加熱炉におけるストリップの加熱方式は、ラジア

* 新日本製鐵(株)名古屋製鐵所 東海市東海町 5-3

* Nagoya Works, Nippon Steel Corporation, Tokai
(Received August 13, 1990)
(Revised November 28, 1990)

(注1) 厚み数 mm のコイルを冷間圧延機によって 1 mm 以下の厚みとする。コイルが塑性変形により硬化するので、後に焼鈍すなわち焼きなましを行い、材料の弾性を回復させる必要がある。

Fig. 1 Outline of Nagoya No. 5 CGL

ントチューブ(注2)を用いた間接加熱方式であり、燃料にはたとえばコークスガス(COG)などを用いる。

2.2 加熱炉動特性モデルの概要

本制御における制御量は加熱炉出口におけるストリップ温度すなわち板温であるが、同時に加熱炉は複数の燃焼ゾーンにより構成されゾーン間の燃焼負荷バランスによってはあるゾーンの温度が高くなることが懸念されるため(ラジエントチューブの寿命低下や最悪の場合溶損を招く)、制御モデルの開発にあたり、板温予測モデルおよび炉温予測モデルを導入した。なお、板温予測モデルおよび炉温予測モデルの構造はすでに当社で開発済みのモデルを採用し⁶⁾、具体的な次数やパラメータは後で述べるように No. 5 CGL の動特性解析により決定した。

まず板温予測モデルの概要を示す。

$$Y(t+d) = \alpha_0 Y(t) + \sum_{i=1}^{\eta_a} \beta_i u(t-i) + \sum_{i=1}^4 C_i V_i(t+d) \quad (1)$$

ただし、

$$U(t-i) = D_{s,f}(t-i) \{F_i(t-i) - \bar{F}_i\} \quad (i=0, 1, \dots, \eta_\beta) \quad (2)$$

$$Y(t) = T_s(t) - \bar{T}_s \quad (3)$$

$$V_i(t+d) = \sum_{j=0}^{d-1} \alpha_0^{(j/d)} W_{fj}(t+d-j) \quad (i=1, \dots, 4) \quad (4)$$

$$D_{s,f}(t) = \frac{\partial(T_{ss}(T_v(t), T_f(t)))}{\partial(T_f(t))} \quad (5)$$

$$T_v(t) = T_h(t) V(t) \quad (6)$$

ここで、 y は板温の平均値からの偏差、 u は燃料流量の平均値からの偏差に基づく仮想的な操作量、 t は時刻(サンプリング周期(1分)単位)、 d は燃料流量変更から板温変化までのむだ時間、 F_i は燃料流量、 T_s は加熱炉出口板温、 T_f は代表炉温(たとえば全ゾーンの炉温単純平均)、 T_h は板圧、 V は通板速度、

$W_1, \dots, W_4$ は板幅、板厚、速度および炉温の関数(既知外乱項)、 T_{ss} は定常状態における加熱炉出口板温(T_v , T_f の関数)、 $D_{s,f}$ は T_f に関する T_{ss} の偏微分係数、 $\bar{F}_i$, $\bar{T}_s$ はおのの F_i , T_s の実操業における平均値、 $\alpha_0, \beta_0, \dots, \beta_{\eta_\beta}, C_1, \dots, C_4$ はモデルパラメータ、 η_β は適当な正の整数を表す。 $W_1, \dots, W_4$ および T_{ss} の関数形詳細については省略する。

つぎに炉温予測モデルの概要を示す。

$$Y_f(t+df) = \alpha_{f0} Y_f(t) + \sum_{i=0}^{\eta_{df}} \beta_{fi} U_f(t-i) + \sum_{i=1}^2 C_{fi} V_{fi}(t+df) \quad (7)$$

ただし、

$$Y_f(t) = T'_f(t) - \bar{T}'_f \quad (8)$$

$$U_f(t) = F_i(t) - \bar{F}_i \quad (9)$$

$$V_{fi}(t+df) = \sum_{j=0}^{df-1} \alpha_{f0}^{(j/df)} W_{fj}(t+df-j) \quad (10)$$

ここで、 t , F_i , $\bar{F}_i$ は上述のとおりであり、 y_f は炉温の平均値からの偏差、 u_f は燃料流量の平均値からの偏差、 T'_f はネックとなる炉温(温度ネックとなるゾーンの温度重みを大きくしたゾーン間の重み付き温度平均)、 df は燃料流量変更から炉温変化までのむだ時間、 W_{f1} , W_{f2} は板幅、板厚および速度の関数(既知外乱項)、 $\bar{T}'_f$ は T'_f の実操業における平均値、 $\alpha_{f0}, \beta_{f0}, \dots, \beta_{f\eta_{df}}, C_{f1}, C_{f2}$ はモデルパラメータ、 η_{df} は適当な正の整数を表す。 W_{f1} , W_{f2} の関数形詳細については省略する。

さて以上からわかるように、板温予測モデルおよび炉温予測モデルは燃料流量を操作量とする ARMA (Auto-Regressive Moving-Average) 型の予測モデルであり、板幅、板厚および速度に関しては将来の生産命令から将来値まで予見可能であるため、これらを既知外乱としてモデル式の中に取り入れることにより精度を向上させている。

2.3 加熱炉動特性モデルの同定

板温予測モデルおよび炉温予測モデルの構造は前節

(注2) 鋳物製のチューブであり、炉内壁に這わせてある。ここに燃料ガスと空気を入れて燃焼させ、輻射熱により炉内のストリップを加熱する。

に述べたとおりであるが、具体的にモデルの次数やモデルパラメータの値を決定する必要があるので、5CGLラインの H/R (ホットラン、ライン稼動前の最終調整) 時に速度や燃料流量を大きく振らせて板温や炉温のデータを採取し、モデルの次数やモデルパラメータの値の検討を行った。本検討に当たっては、所内ビジネスコンピュータにインストールされている統計解析パッケージ SAS⁷⁾を利用してモデル式のステップワイズ重回帰分析を行い、また赤池の情報量基準 (AIC 基準)⁶⁾による評価計算なども利用して多角的な検討を実施した。その結果判明したのは、操業条件変動などにより採取されたデータが異なるとモデルの次数の最適値およびむだ時間の値が若干変動することであり、明確に一意的に決定できないことである。そのため、種々検討した結果、最も代表性があると考えられるデータを基にして重回帰分析や AIC の評価計算を行い、モデルの次数、むだ時間およびモデルパラメータの値を決定した。

3. 最適制御系の設計

3.1 制御方式の決定

最適な制御方式の決定に当たっては、つぎに述べる各指針によった。

(1) 将来の板温および炉温の予測値と目標値との偏差が容易に制御計算に取り込めること。

(2) モデルの次数およびむだ時間の変動にたいしてロバストであること。

(3) モデルが非最小位相推移系になりうるので、本特性に対して制御系が安定であること。

各指針について簡単に説明を加えれば、まず(1)については、プロセス特性にはむだ時間や時間遅れがあるため将来の目標板温変更をある程度早めに取込み早期アクションを取ることで制御精度を向上させたいということであり、つぎに(2)については、前章でも述べたようにモデルの次数の変動 (1~2 次程度) やむだ時間の変動 (2~4 分程度) があるのでこれに対して制御が不安定にならないあるいは制御性能が悪化しないことが求められるということであり、最後に(3)については、加熱炉内でのストリップ長さは数百 m に及び、ストリップ上のある点が加熱炉の入口に入ってから出口 (板温計測点) に至るまでには数分の時間がかかり、なおかつ相対的に直近の操作量より過去の操作量のほうが板温に寄与する割合が大であるため、モデル式(1)での係数の大小関係は $\beta_i > \beta_j$ ($i > j$) となる傾向があり、非最小位相推移系になりやすいということである。

以上の観点から、最適な制御方式として Clarke らによる一般化予測制御 (Generalized Predictive Control)^{1),2)}を適用することにした。また一方で、長期間にわたる動特性の緩慢な経時変化が想定され、これによる制御精度の悪化を防止し常に良好な精度を発揮するため、モデルパラメータのオンライン適応修正機能を付加した。なお、他の制御方式としてロバスト制御 (H_∞ 制御理論) やスミス補償器によるむだ時間補償制御なども考えられるが、ロバスト制御はプロセスの動作点の変化などによる急激な特性変化に有効であるが、加熱炉の動特性は操業条件や経時変化により比較的緩慢にしか変化しないため、ロバスト制御より self-tuning control による精度向上のほうが有効であると考えられ、またスミス補償器による制御を適用するにはむだ時間の変動幅が大きく、スミス補償器による制御では制御性能が悪化すると懸念されたため、一般化予測制御型 STC が最適であると判断したものである。そして、適応修正方式としては、実プロセスでの適用実績が多い逐次型最小 2 乗法をベースにして、これを改良したモデルパラメータごとに異なる適応修正速度が設定できるベクトル型忘却係数をもつ重み付き最小 2 乗法³⁾を適用することにした。ここで特に重み付き最小 2 乗法とした理由について述べると、ストリップの加熱炉出口板温基準 (ヒートサイクル) や鋼種によりストリップの通板される量が異なるため、通板量の多いヒートサイクルや鋼種のストリップにモデルパラメータが合せてこられ、通板量の少ないヒートサイクルや鋼種のストリップにおけるモデルの推定誤差が大きくなることが懸念されるためであり、本適用においては通板量の少ないストリップに対する重みを相対的に大きくしてパラメータの偏りを防止している。すなわち下記のパラメータ推定の評価関数 $J\epsilon$ において重み W_i を通板量の少ないストリップに対して大きくするものである。

$$J\epsilon = \sum_i W_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

ただし、

y : 実測板温

$\hat{y}$: 予測板温

i : サンプリング時点

なお、適応修正における適応ゲイン行列の更新にあたっては、数値計算上の安定性を考慮して UD 分解法⁴⁾を採用している。

また、本適応修正は、ライン稼動後のモデルパラメータの同定を自動的に行うことにより板温制御の早期安定稼動を図ることも目的としている。

3.2 評価関数の決定

第 2.2 節でも述べたように、最適制御の目的は板温が目標値に追従することに加えて温度ネックとなる燃焼ゾーンの炉温が上限を越えないようにすることであり、この観点から制御の評価関数 J をつぎのように決定した。

$$J = W_1 \sum_{j=d}^{N_2} \{r(t+j) - y(t+j)\}^2 \\ + W_2 \sum_{j=d_f}^{N_{2f}} \{r_f(t+j) - y_f(t+j)\}^2 \\ + W_3 \sum_{k=1}^{NU} \Delta u(t+k-1)^2$$

ただし、

r : 目標板温

y : 予測板温

r_f : 目標炉温

y_f : 予測炉温

Δu : 操作量変更量

N_2 : 板温の予測時間

N_{2f} : 炉温の予測時間

NU : 燃料流量の計算時間

W_1, W_2, W_3 : それぞれ、目標板温と予測板温との偏差の重み、目標炉温と予測炉温との偏差の重み、加熱炉の燃料流量の変動量（変更量）の重み

そして Fig. 2 に示すように目標炉温 r_f を炉温の上限値より少し小さい値に設定し、目標板温と予測板温との偏差の重み W_1 を実績の炉温が上限に近づくにつれて次第に小さくし、逆に目標炉温と予測炉温との偏差の重み W_2 を炉温が上限に近づくにつれて次第に大きくすることにより実績の炉温が上限を外れることを防止することができる。すなわち、炉温が上限に近づくにつれて次第に板温制御から炉温（上昇防止）制御に滑らかに移行するものである。

ここで燃料流量の変動を過敏にしたくないために、またオンラインで逆行列計算を行うのを回避するために燃料流量の計算時間 NU は 1 に設定したが、制御の

Fig. 2 Functions of weight W_1 and W_2

応答性には特に問題はなかった（文献 1）においてもプロセス系で不安定な極や振動的な極をもたない場合は、 $NU=1$ で妥当な制御性能が得られることを述べている。

また、 d, d_f は前章で述べたように、それぞれ燃料流量変更から板温変化までのむだ時間、燃料流量変更から炉温変化までのむだ時間であり、 N_2, N_{2f} はそれぞれ板温の立上がり時間、炉温の立上がり時間に近い値としている。

4. 制御の調整

前章で述べた評価関数において、燃料流量変動量の重みである W_3 の値の大きさにより、制御の応答性が決定されるが、最初は燃料流量の変動が小さくなる（安全サイド）ように W_3 の値を大きく設定しチューニングを開始し、実板温の応答性をみながら徐々に W_3 の値を小さくしてゆき、最適値に設定した。

また、板温の予測時間 N_2 や炉温の予測時間 N_{2f} は最初はむだ時間 + 伝達関数の分子の次数程度としていたが、目標板温変更時の追従性向上を図る必要があるため最終的にはこれらの値をやや長くし、早期の制御アクションをとるようにしてこれに対処した。

なお、板温予測モデルの伝達関数の分子多項式の特性根すなわち零点のある期間における値を Fig. 3 の複素平面内に示す。図から明かなように零点が単位円内および単位円外に存在しており、モデルが非最小位相推移系になっているのがわかる。

Fig. 4 に本制御の制御チャートの一例を示すが、目標板温に良好に追従できている。なお、本制御はラインの H/R の後半より調整を開始し、ライン稼動後約 2 週間ではば調整を完了することができた。

Fig. 3 Zeros of strip temperature prediction model

Fig. 4 Actual control

また、制御稼動後数ヶ月の間でモデル式(1)および(7)の α_0 , α_{f0} の値は1%程度、 β_i , β_{fi} の値は数十%とかなり大きく変動しているが、制御精度は良好であり、一般化予測制御型 STC の有効性が確認できた。最後に、本制御開発においてはラインの立上げ当初より一般化予測制御型 STC による板温制御が機能し、またその調整も短期間で完了したため、本制御の効果は明確にはいえないが、従来の静的な熱収支モデルによる制御を行っている類似ラインと比較すれば、板温ばらつきが2/3ないし半減したことを述べておきたい。

5. おわりに

一般化予測制御型 STC を連続溶融亜鉛メッキラインの加熱炉板温制御に適用して良好な制御結果を得た。

本制御は弊社名古屋製鐵所の No. 5 CGL で現在順調に稼動中であり、本制御の基本的な考え方は現在建設中である弊社名古屋製鐵所 No. 2 CAPL (連続焼鈍設備) および君津製鐵所 No. 2 CAPL にも踏襲されている。今後も類似ラインへの適用拡大を図ってゆきたい。

参考文献

- 1) D.W. Clarke, C. Mohtadi and P.S. Tufts: Generalized Predictive Control-Part I, The Basic Algorithm, *Automatica*, **23**-2, 137/148 (1987)
- 2) D.W. Clarke, C. Mohtadi and P.S. Tufts: Generalized Predictive Control-Part II, Extensions and Interpretations, *Automatica*, **23**-2, 149/160 (1987)
- 3) 芳谷直治: ベクトル型忘却係数を用いたパラメータ逐次推定とその実プラントへの適用, 計測自動制御学会論文集, **25**-5, 71/77 (1989)
- 4) G.J. Bierman: Brief Paper, Measurement Updating Using the U-D Factorization, *Automatica*, **12**, 375/382 (1976)
- 5) H. Akaike: Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle, Proc. 2nd Ind. Symp. Information Theory, Akademiai Kiado, 268/281, Budapest (1972)
- 6) 芳谷直治: 連続焼鈍処理設備 (C.A.P.L.) の加熱炉最適板温制御法, 計測と制御, **25**-11, 1032/1038 (1986)
- 7) J. Shall: SAS Regression Applications, SAS Institute Inc. (1981)