
連続溶融めっき設備における自動操業技術

Techniques of Automatic Operation in Continuous Galvanizing Line

安達 孝徳(Takanori Adachi) 戸村 寧男(Yasuo Tomura) 吉岡 孝之(Takayuki Yoshioka)

要旨：

川崎製鉄における連続式溶融亜鉛めっきライン（CGL）の主な自動化技術としては、入側設備の自動化、亜鉛付着量制御自動化、合金化度制御自動化があり、品質向上と省力化に貢献している。入側はプロセスコンピュータによってコイル搬入および入側通板設備の自動化を実現し、無人化を達成している。亜鉛付着量制御は、解析モデルを構築し自動制御に適用することで、目標付着散変更時の標準偏差 $\sigma = 3.0 \text{ g/m}^2$ の精度を達成している。また、合金化度制御は、亜鉛めっき層中に鉄が拡散する際に生じる放射率変化を利用した自動制御を行うことで、合金化度の標準偏差を半減し $\sigma = 3.0\%$ の精度を達成している。

Synopsis：

Operation at the entry section, zinc coating weight control, and galvannealing control are main techniques of automatic operation in continuous galvanizing lines at Kawasaki Steel. These techniques contribute to quality improvement and labor saving. The coil transport and threading equipment in the entry section have been automated by a process computer. Automatic zinc coating weight control, which uses an analysis model, has achieved high accuracy of a standard deviation of 3.0 g/m^2 of the zinc coating weight, when the zinc coating weight target is changed. Automatic galvannealing control, which uses emissivity changes when Fe diffuses in the zinc coating layer, has also reduced the standard deviation of the Fe contents by half, achieving a high accuracy of 0.3%.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Techniques of Automatic Operation in Continuous Galvanizing Line



安達 孝徳
Takanori Adachi
千葉製鉄所 第2冷間
圧延部冷延技術室



戸村 寧男
Yasuo Tomura
千葉製鉄所 プロセス
開発部制御開発室 主
査(部長)



吉岡 孝之
Takayuki Yoshioka
水島製鉄所 プロセス
開発部制御自動化技
術開発室

要旨

川崎製鉄における連続式溶融亜鉛めっきライン(CGL)の主な自動化技術としては、入側設備の自動化、亜鉛付着量制御自動化、合金化度制御自動化があり、品質向上と省力化に貢献している。入側はプロセスコンピュータによってコイル搬入および入側通板設備の自動化を実現し、無人化を達成している。亜鉛付着量制御は、解析モデルを構築し自動制御に適用することで、目標付着量変更時の標準偏差 $\sigma=3.0\text{ g/m}^2$ の精度を達成している。また、合金化度制御は、亜鉛めっき層中に鉄が拡散する際に生じる放射率変化を利用した自動制御を行うことで、合金化度の標準偏差を半減し $\sigma=0.3\%$ の精度を達成している。

Synopsis:

Operation at the entry section, zinc coating weight control, and galvannealing control are main techniques of automatic operation in continuous galvanizing lines at Kawasaki Steel. These techniques contribute to quality improvement and labor saving. The coil transport and threading equipment in the entry section have been automated by a process computer. Automatic zinc coating weight control, which uses an analysis model, has achieved high accuracy of a standard deviation of 3.0 g/m^2 of the zinc coating weight, when the zinc coating weight target is changed. Automatic galvannealing control, which uses emissivity changes when Fe diffuses in the zinc coating layer, has also reduced the standard deviation of the Fe contents by half, achieving a high accuracy of 0.3% .

1 緒 言

当社連続式溶融亜鉛めっき設備(CGL)は、水島製鉄所において1989年5月からNo.1 CGL¹⁾が、千葉製鉄所において1991年8月からNo.2 CGL²⁾が稼働を開始した新鋭設備である。したがって近年の顧客の品質要求厳格化に対応すべく、また国際競争力向上のために自動操業比率の高い設計思想で建設されている。特に、入側設備の自動化、亜鉛付着量制御および合金化度制御の各自動化の実現は、品質向上および省力化に大きく寄与しているので、本稿においてそれら自動化技術の概要を述べる。

2 製造プロセス概要

Fig. 1に千葉製鉄所No.2 CGLのレイアウトを示す。冷間圧延ミルで圧延されためっき原板コイルは、自動的にペイオフロールに装入され、先端口出し、溶接等が自動で行われている。その後ストリップはトリミングされ、自動制御されている焼鈍炉において所定の温度に昇温され、めっき浴に侵入する。

めっき浴直上ではストリップをはさみ込むようにスリットノズルが設置され、吐出ガスによって所定のめっき付着量に制御され、さらに合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA材)製造時には、合金化炉に

てストリップが加熱され、合金化度が制御される。

そして、スキンパスミル、テンションレベラーを通過後、必要に応じてクロメート処理、オイルングが行われテンションリールに巻取られる。

3 入側設備の自動化

当社CGLは、当初より入側設備の無人化を想定して建設されており、各自動機器のレベルアップを行うことにより、水島製鉄所No.1 CGLにおいて1992年5月から、千葉製鉄所No.2 CGLにおいて1994年9月から入側設備の無人運転を開始し現在に至っている。

3.1 コイルストレージ設備

冷間圧延ミルで圧延されためっき原板コイルは、コイル台車でCGL入側ヤードに搬入され、センタリング装置でセンタリングされた後、ヤード台車により所定のコイル地番に格納される。コイルヤードに貯蔵されたコイルは、装入計画にしたがって、CGL本体設備へ装入される。

コイルの置場管理、搬入、払い出しは、すべて専用のプロセスコンピュータで管理され、自動、無人運転を可能としている。Fig. 2に水島製鉄所No.1 CGLの入側コイルヤード概要を示す。

* 平成7年9月18日原稿受付

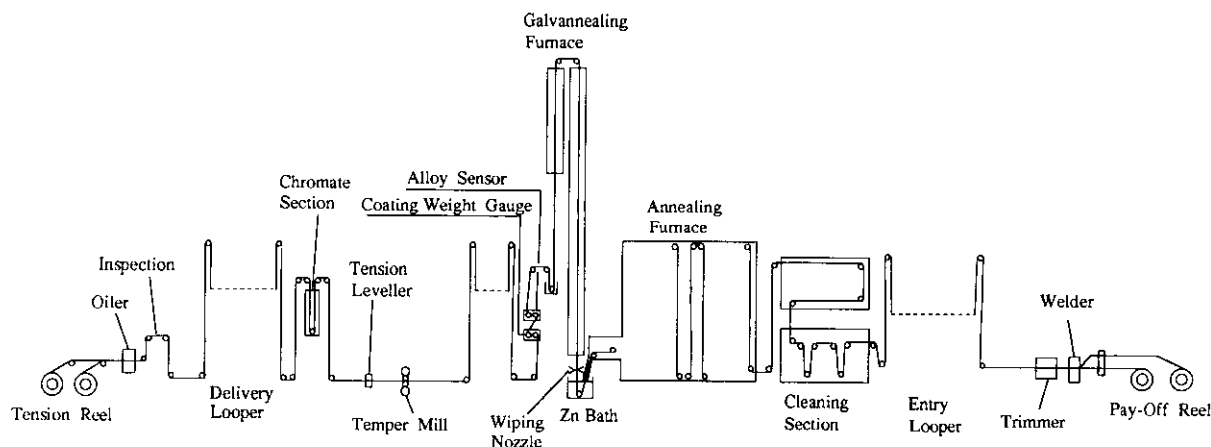


Fig. 1 Layout of Chiba No.2 continuous galvanizing line (CGL)

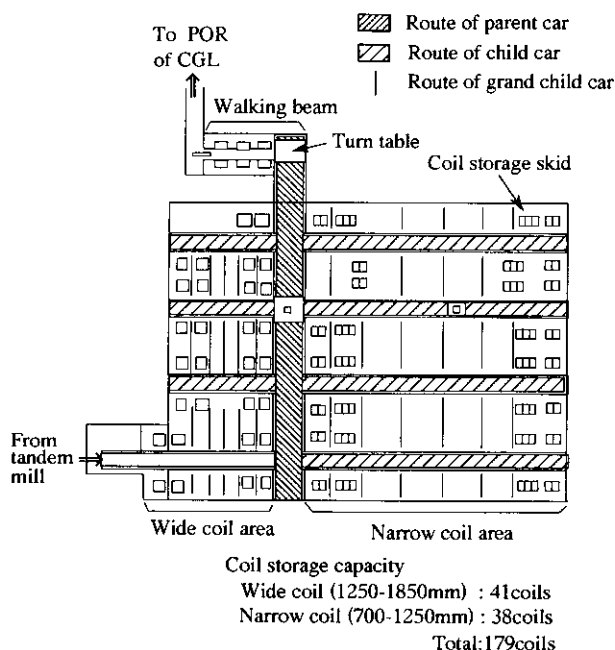


Fig. 2 Top view of entry coil storage yard

3.2 コイル搬送設備

入側コイル段取り搬送はすべて自動化されており、主な自動化機器としては以下のものがあげられる。

- (1) ターンテーブル (コイルの先端口出し方向変更)
- (2) バンドカッター (バンドの処理)
- (3) ウォーキングビーム、コイルバギー (コイル搬送)
- (4) コイルカー (コイル受取り、高さ調整、コイル装束)

Fig. 3 に水島製鉄所 No.1 CGL の入側コイル搬送設備概要を示す。

3.3 入側通板設備

Fig. 4 に入側通板設備の主な自動化項目を示す。コイル先端口出し、ラフレベラーによる反り矯正、先端処理通板、溶接まで自動化されており、またモニターテレビを用いて中央運転室よりの遠隔監視、操作が行えるようになっている。

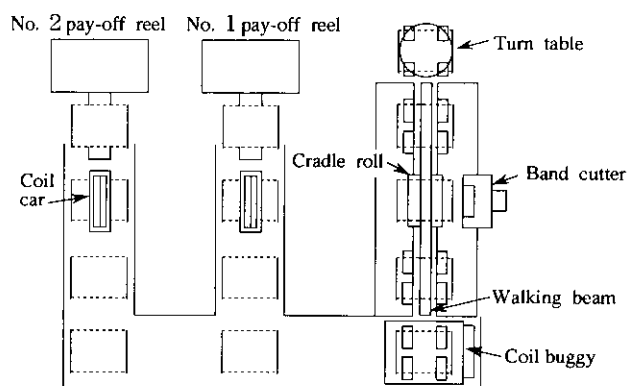


Fig. 3 Outline of coil carrier equipment in the entry section

4 亜鉛付着量制御自動化

亜鉛付着量は亜鉛ポット直上に設置されたワイピングノズルのワイピングガス圧力、ノズル間隔を操作することにより制御される。この操作量を目標付着量に対し適切に設定するには、現在の操業条件から最適な設定値を求める精度の良いモデル式が必要である。亜鉛付着量制御においては、ワイピング現象を正確に表現する解析モデルを開発し、各操業条件と付着量の関係を定量化した。また、鋼板のパスライン変動に追従しうる制御系とするためにノズル間隔を測定する距離計を導入し、Fig. 5 に示す高精度の付着量自動制御システムを構築した。

以下に水島製鉄所 No.1 CGL の適用を述べる。

4.1 亜鉛付着量モデル

2次元噴流理論⁹⁾を適用した解析モデルを用いることで、60 g/m²以下の付着量域での予測精度を±1.5 g/m²に向上させた。ワイピングガスの噴流領域に応じてノズル間隔の付着量に対する影響が異なり、モデル式は鋼板～ノズル間距離とノズルスリット幅に応じて以下の2式から構成される。

・展開領域 ($D/B \leq C$)

$$M = L_1 \cdot a_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta}} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\frac{\mu_s \cdot L_s}{\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1}} \quad (1)$$

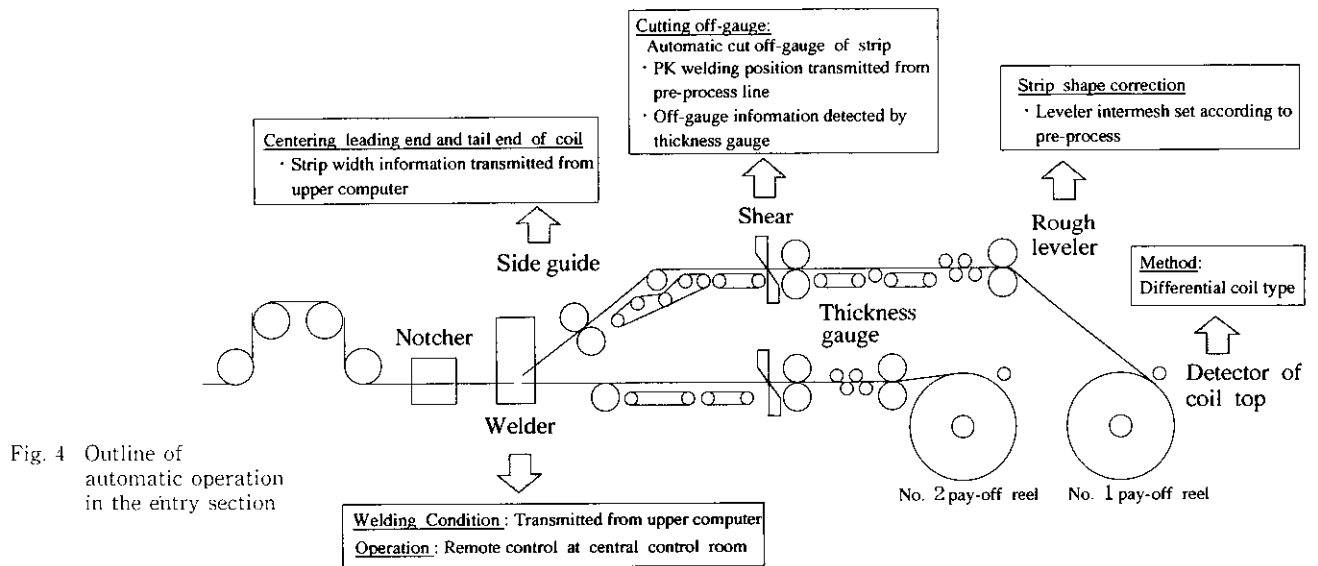


Fig. 4 Outline of automatic operation in the entry section

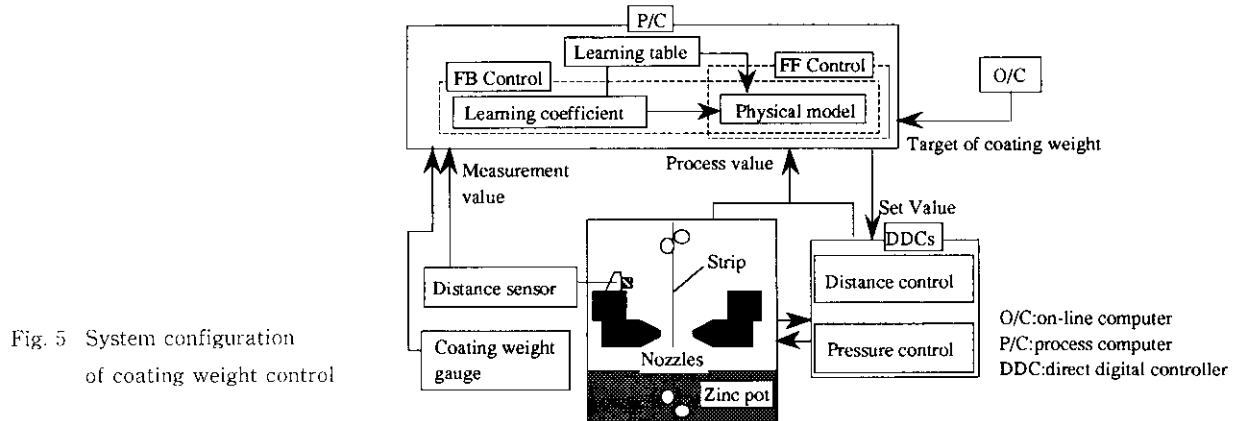


Fig. 5 System configuration of coating weight control

・完全発達領域 ($D/B > C$)

$$M = L_2 \cdot b_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta}} \cdot \frac{D}{\sqrt{B}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_z \cdot L_s}{\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

M : 付着量 (g/m^2)
 η : ノズル効率
 D : 銅板～ノズル間距離 (mm)
 μ_z : 亜鉛粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
 L_s : ライン速度 (m/min)
 P : ガス圧力 (Pa)
 γ : 比熱比
 P_0 : 大気圧 (Pa)
 B : ノズルスリット幅 (mm)

L_1, L_2 : 学習係数

a_1, b_1, C : 定数

4.2 ノズル距離計

銅板とワイピングノズル間の距離は、ワイピングノズル上に渦流式距離計を設置し、銅板のパスライン変動をリアルタイムに測定することにより、ダイナミックに制御される。

渦流式距離計はワイピングノズル近傍での亜鉛粉、スプラッシュの影響を受けず、また測定範囲が他方式の距離計に比べ広範囲であ

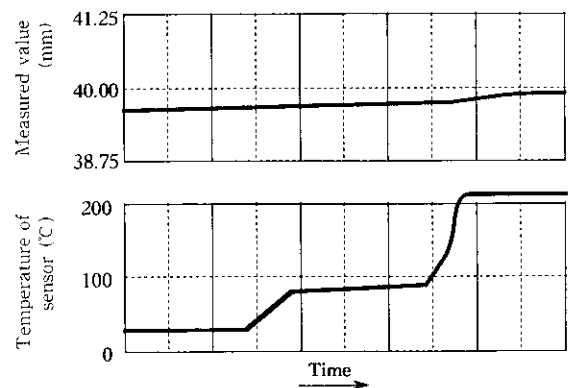


Fig. 6 Characteristics of distance sensor

るため、局所的な銅板の反りを平均化する特性があり、制御に適している。一方、渦流式距離計は温度変化の影響を受けるが、本距離計では本体は熱膨張係数の低いセラミック系材を使用し、また内部導線に温度的に安定なPd系合金を使用した。さらにセンサー本体を熱電対構造とし温度補償を行っている⁵⁾。その結果、本距離計は、Fig. 6に示すように温度変化に対し安定な特性を実現している。

4.3 付着量制御方法

付着量はライン速度や亜鉛浴温度の変化の影響を受ける。しかし付着量計はワイピングノズルの後方約 130 m の位置に設置されているため、フィードバック制御のみではライン速度の変更等の外乱が発生した場合、制御を行うための無駄時間が大きく対応できない。

そこで鋼板全長における均一な付着量を得るため、付着量制御は以下の各機能を有する。

4.3.1 フィードフォワード(FF)制御

5 秒ごとにライン速度、ノズル間隔実績値を収集し、設定替えや手動介入が発生した場合、ダイナミックに解析モデルからノズル間隔、ワイピングガス圧力の設定値を計算し解析を行う。解析モデル(1)式、(2)式は、ノズル間隔の次設定値に合わせて切り替える。

4.3.2 フィードバック(FB)制御

付着量実績測定部のワイピングノズル通過時の操業状態が定常状態である場合は、付着量実績値が計上されたタイミングで以下の式により学習係数 L_n ($n=1$ or 2) を計算する。

$$L_n = M_p / M_c \quad (3)$$

M_p : 付着量実績 (g/m^2)

M_c : 計算付着量 (g/m^2)

M_c は、(1)式および(2)式において $L_n = 1$ とした後、付着量測定部の操業実績を代入して求める。計算した L_1 , L_2 を(1)式、(2)式に取り込み、ノズル間隔とワイピングガス圧力の再設定を行う。また、 L_n は操業条件や鋼板の品種に応じて層別された学習テーブルに格納する。

4.3.3 学習制御

目標付着量や板厚等が変化する溶接点での設定替え時は、学習テーブルより該当する条件に格納された学習係数 L_1 , L_2 を物理モデルにセットし、ノズル間隔やワイピングガス圧力の計算、設定を行う。

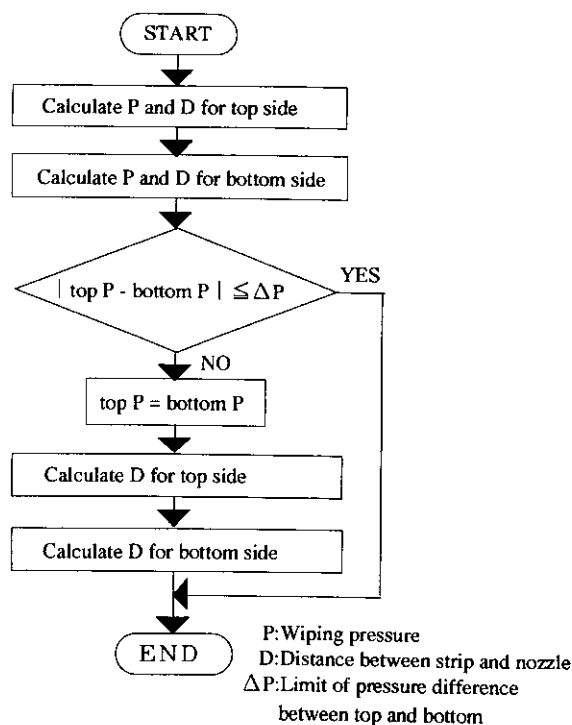


Fig. 7 Flow of equal pressure control

4.3.4 表裏ガス圧力等圧機能

表裏のワイピングガス圧力に差が生じる場合、スブラッシュ等の品質欠陥を生じる可能性がある。そこで本システムでは、Fig. 7 のフローにより常に表裏ワイピングガス圧力の差が一定値以下になるようにノズル間隔、ワイピングガス圧力の設定値の決定を行い、スブラッシュ発生による品質欠陥の発生を抑制している。

4.4 実施状況

Fig. 8 に付着量実績値と付着量モデルによる付着量計算値の比較結果を示す。誤差標準偏差は $1.5 \text{ g}/\text{m}^2$ であり、十分な精度を達成している。Fig. 9 に、等厚目付から差厚目付への変更時の制御実施例を示す。表裏のガス圧力を揃えながらノズル間隔と共に操作し、表裏付着量を目標値に制御している。

Fig. 10 に、目標付着量変更時の FF 制御の精度評価として、コイル先端部における目標付着量と実績付着量の偏差の分布を示す。標準偏差 $\sigma = 3 \text{ g}/\text{m}^2$ であり、良好な結果が得られた。

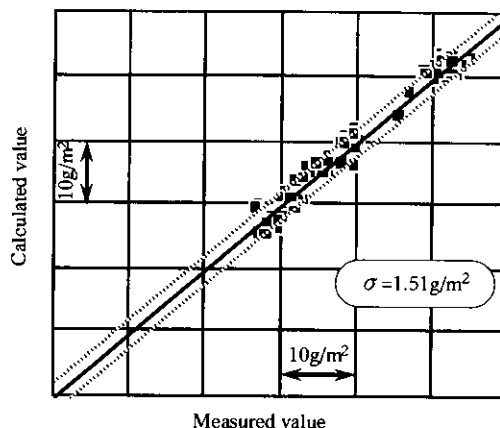


Fig. 8 Correlation between calculated and measured coating weights

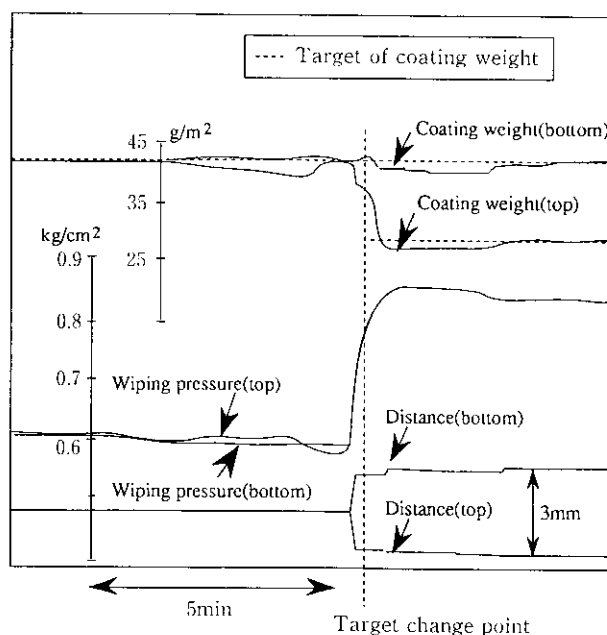


Fig. 9 Example of coating weight change by the automatic control

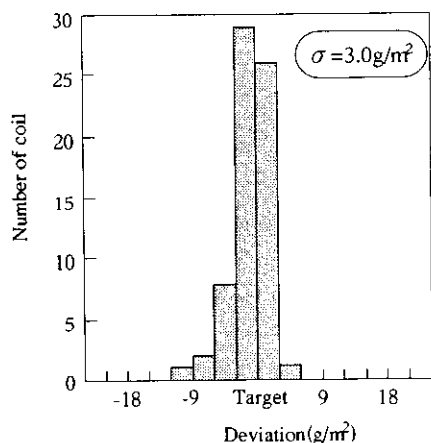


Fig. 10 Deviation of coating weight (results of automatic control)

5 合金化度制御自動化

GA 材は、合金化炉内で亜鉛めっき層中に鉄を拡散させることで製造されるが、GA 材の加工性はこの鉄の拡散量（合金化度）によって変化する。よって、加工性をよくするためには最適な合金化度に常に管理することが重要である。

当社では、既に X 線回折を原理とするオンライン合金化度計⁶⁾（Kawasaki Alloy Sensor；めっき層中の鉄含有率測定装置）を開発し合金化度の管理に実用化しているが、さらに、亜鉛めっき層中に鉄が拡散する際に生じる鋼板の放射率変化に着目して、合金化炉内で合金化の進行状況を捉え、合金化度を推定する技術を開発した。

さらにこの推定値を用いたフィードバック制御技術と、めっき条件変更点でのフィードフォワード制御技術を実用化することで高品質な GA 材製造と合金化炉操業の自動化を達成している。

以下に千葉製鉄所 No.2 CGL の適用を述べる。

5.1 合金化度の推定

合金化度の推定は、亜鉛めっき層中に鉄が拡散する際に生じる放射率変化を利用して合金化の進行状況を合金化炉内で捉えることを行う。

GA 材製造時、合金化炉内で鋼板表面の放射率が約 0.20 から 0.65 程度まで急激に変化することが知られている⁷⁾。この放射率変化を、合金化炉保持帯へ放射温度計を鋼板走行方向に配置することで検出する (Fig. 11)。このとき、放射率が急激に変化する点を合金化位置 (galvannealing point : GP) とする。GP は保持帯入口からの距離で表され、めっき層中の η 相が消失する点と考えることができる。

Fig. 12 に極低炭材の場合の GP とオンライン合金化度計測定値の関係を示す。Fig. 12 に見るように、GP とオンライン合金化度計測定値の間には相関がある。これは、GP によって合金化度が推定できることを意味している。

合金化度の推定は、GP から決まる保持時間 (Fig. 11) と合金化炉内の板温をパラメータとする回帰式で求めている。

Fig. 13 に回帰式で求めた合金化度推定値とオンライン合金化度

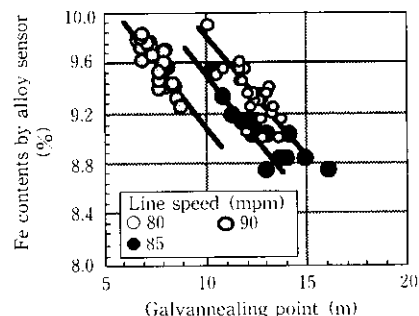


Fig. 12 Relationship between galvannealing point (distance from entrance of soaking section) and Fe contents in coating layer as measured by Kawasaki Alloy Sensor

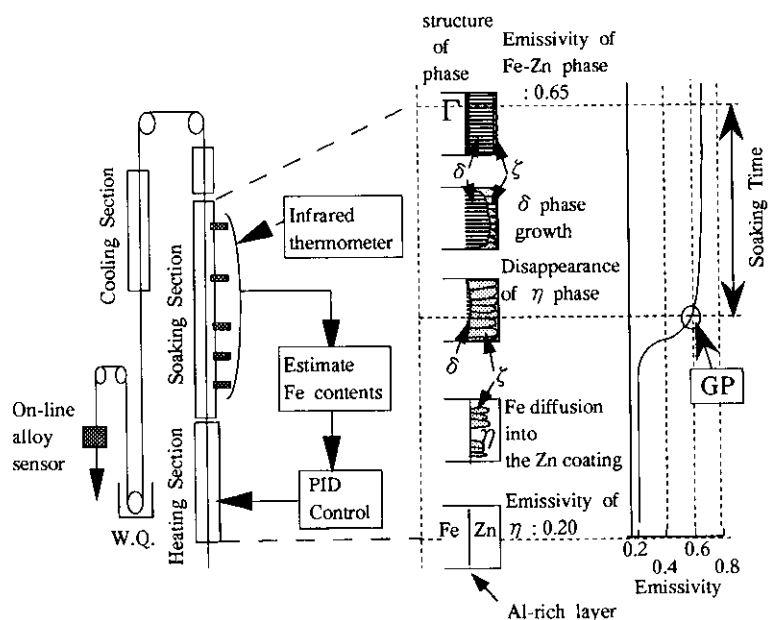


Fig. 11 Change in the coating structure during galvannealing

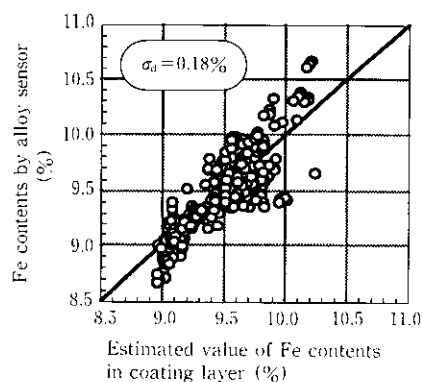


Fig. 13 Correlation of the estimated Fe contents in coating layer evaluated from galvannealing point and that measured with Kawasaki Alloy Sensor

計測定値の関係を示す。Fig. 13 に見るように、合金化度推定値とオンライン合金化度計指示値の間には相関があり、(4)式で求まる正確度(accuracy) σ_d で $\sigma_d = 0.18\%$ を達成した。

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum (m_i - X_i)^2}{n-1}} \dots\dots\dots (4)$$

m_i : 合金化度推定値 (%)

X_i : 合金化度計測定値 (%)

n : サンプル数

5.2 システム構成

Fig. 14 に合金化度制御システムの構成図を、Fig. 15 にブロック図を示す。合金化度制御は、千葉製鉄所冷延工場の複数生産ラインの包括的プロセスコンピュータシステム[®] (CANS: cold auto-

Fig. 14 System configuration of galvannealing control

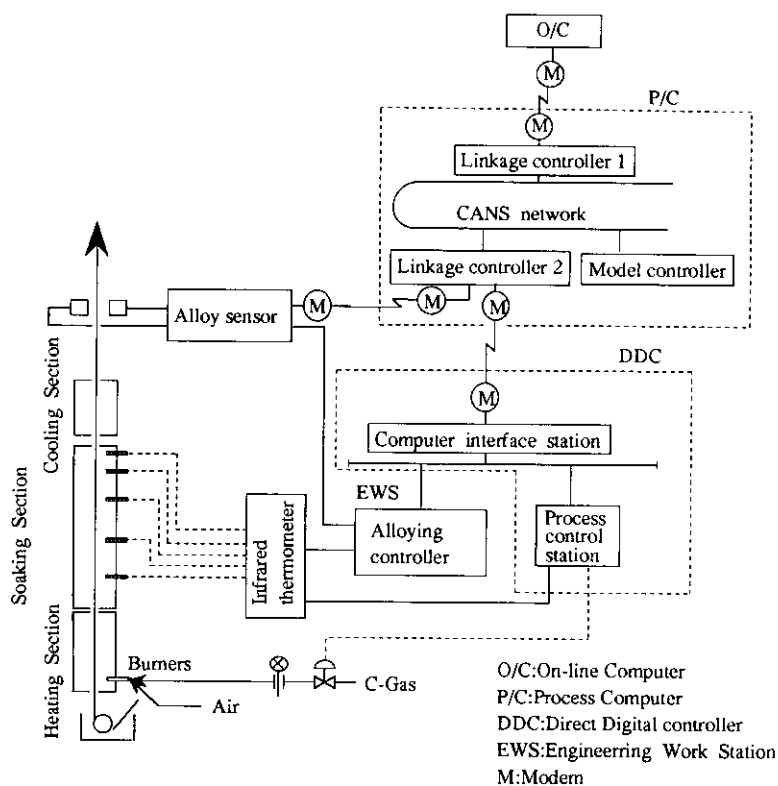
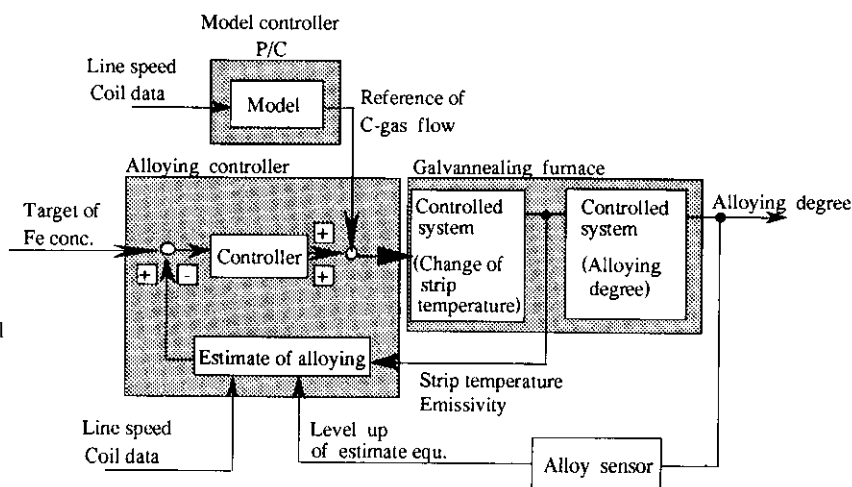


Fig. 15 Block diagram of the galvannealing control system



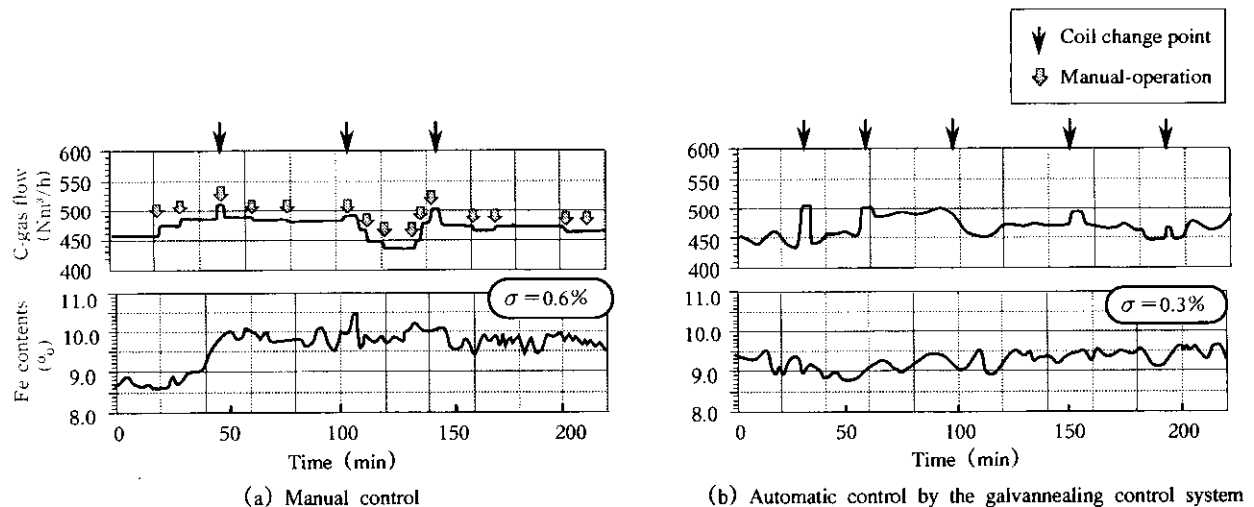


Fig. 16 Comparative results of manual and automatic galvannealing control

mous network system) 内に組み込まれた No.2 CGL モデル系 P/C (process computer) と、No.2 CGL 計装 DDC (direct digital controller) 内の専用回線内に接続させた EWS (engineering workstation) で実施している。モデル系 P/C では合金化度予測モデルを持ちこのモデルによるフィードフォワード制御を行っている。EWS では 5.1 項で示した合金化度の推定と PID 制御によるフィードバック制御を行っている。また、オンライン合金化度計の指示値を用いて推定式のオンライン補正も行っているが、推定式は鋼種ごとに持ち、鋼種の影響も考慮して精度向上を図っている。

5.3 実施状況

Fig. 16 に本制御実施例を示す。マニュアル操作の場合、合金化度の標準偏差は $\sigma = 0.6\%$ であるが、本自動制御システムにて自動制御することで標準偏差が $\sigma = 0.3\%$ と半減し手介入が不要となった。

現在、極低炭材において本制御を 100% 実施しており、品質の向上と、合金化操業の安定化に寄与している。他鋼種に関しても適用を推進中である。

6 結 言

川崎製鉄の連続式溶融亜鉛めっき設備における自動操業技術として、入側設備自動化、亜鉛付着量制御自動化、および合金化度制御自動化を紹介した。これらをまとめると以下のとおりである。

- (1) 入側設備において各自動機器のレベルアップおよびプロセスコンピュータのレベルアップを行うことにより、自動機器トラブルが大幅に減少して、入側設備操作無人化を達成した。
- (2) 亜鉛付着量は、ワイピング現象を正確にとらえた付着モデルの開発、およびノズル間隔を測定する距離計を導入等の自動化開発により目標付着量変更時の標準偏差 $\sigma = 3.0 \text{ g/m}^2$ を達成し、付着量変動の少ない製品の製造が可能となった。
- (3) 合金化度は、亜鉛めっき層中に鉄が拡散する際に生じる放射率変化を利用した自動技術の開発により、合金化度の標準偏差を半減し $\sigma = 0.3\%$ となり、安定的に良好なめっき品質を有する製品の製造が可能となった。

参 考 文 献

- 1) 喜安哲也, 飯田祐弘, 重本晴美, 菅沼七三雄, 坂本 実, 岩本周治: 川崎製鉄技報, **23**(1991)4, 327
- 2) T. Sekita, S. Iida, T. Kiyasu, H. Shigemoto, S. Uchiyama, and N. Suganuma: "Development of New CGL at Kawasaki Steel for Automotive Use," 2nd International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet, Centre de Recherches Metallurgiques, (The Netherlands), (1992), 301
- 3) 新井 信, 秋吉勝則, 東 将, 井田幸夫, 増野豊彦, 近藤道生: 材料とプロセス, **2**(1992)5, 666
- 4) 安達一成, 重本晴美, 関田貴司, 小橋正満: 材料とプロセス, **6**(1993)5, 1560
- 5) 今池 宏: 新川技報, **2**(1984), 2
- 6) 川辺順次, 藤永忠男, 木村 肇, 押場和也, 阿部忠広, 高橋俊雄: 川崎製鉄技報, **18**(1986)2, 129-135
- 7) 徳永良邦, 山田正人: 鉄と鋼, **70**(1984)14, 97
- 8) 齊川夏機, 森 淳, 横田広幸, 吉永茂樹, 橋沢正明, 平瀬幸一: 材料とプロセス, **1**(1988)2, 592