ゾーン法による連続亜鉛メッキ設備無酸化炉 の伝熱解析

陣内秀信*, 颯田博則*, 宮谷仁士*, 山本耕太郎*

An Analysis of Heat Transmission on the Non-oxidizing Furnace in the Continuous Galvanizing Line by Zone Method

Hidenobu Jinnouchi, Hironori Satta, Hitoshi Miyatani
and Kohtaro Yamamoto

Synopsis

Zone method formulated by H.C. Hottel and others is valid to solve radiative heat transmission within the enclosure containing gas inside.

This method has been applied to various thermal processes as high speed computer progresses.

Authors have developed a program for the non-oxidizing furnace in the continuous galvanizing line by this method.

In this paper, fundamental formulae are explained, and calculated results for changes in various parameters such as height of the furnace, strip width, emissivities of strip or refractory and others are discussed.

1. 結 言

ゾーン法はHottel¹⁾らにより開発された炉内の放射伝熱の解析法であるが、その計算の複雑さから、なかなか一般に使用されるまでに至らなかった。しかし、近年省エネルギー化あるいは製品の高品質化などのニーズに対する設備の最適設計の必要性和コンピュータの急速な大形化・高速化が可能になったことが相まって、ボイラ、工業窯炉などの伝熱解析^{2),3)}に徐々に適用されるようにな

ってきた。

ここでは、ゾーン法を鋼板の連続亜鉛メッキ設備(CGL)のなかの無酸化炉に適用し、炉形状、炉壁・鋼板の放射率、空気比などの変化が炉の性能にどのように影響するか試算した。

2. ゾーン法による伝熱解析

2.1 解 析 モ デ ル

CGLは熱間圧延された鋼板を焼鈍し、亜鉛メッキする設備である。その中で無酸化炉は最も上流側に位置し、鋼板をハースロールにより連続的に搬送しながら所定の温度まで加熱するものである。無酸化炉はNOF(加熱帯)とPHF(予熱帯)

昭和59年7月12日受付

*大同特殊鋼㈱機械事業部設計部

Fig. 1 Non-oxidizing furnace of continuous galvanizing line.

に別かれており、鋼板は PHF 部で予熱され、NOF 部で無酸化状態で加熱される。

無酸化炉の構造は Fig. 1 に示す通りである。

Fig. 1 に示した無酸化炉の伝熱を解析するにあたって計算を簡略化するために次のような仮定を行った。

- (1) 炉は鋼板を境に上下に分割されるが、上下は対称のものとして、上部についてのみ計算する。
- (2) 炉は長手方向に PHF を 6 等分、NOF を 3 等分の計 9 等分し、その分割されたゾーン内では炉壁および燃焼ガスの温度は均一なものとする。また、鋼板は各ゾーン内で直線的な温度分布をもっているものとする。
- (3) 鋼板は内部への熱伝導が無視できる程十分薄いので厚み方向の温度は均一とする。また、幅方向の温度分布も均一とする。
- (4) 各バーナの燃焼はそのゾーン内で完了するものとする。

のとする。

- (5) 燃料はガス燃料とし輝炎放射はないものとする。

以上のような仮定に基づいて、炉形は Fig. 2 のようにモデル化された。また、この炉の標準的な仕様は Table 1 に示された通りである。

2.2 計 算 方 法

2.2.1 概 要

ゾーン法は炉内を^(注)微小なガスゾーンと面ゾーンに分割し、そのおのおのの微小ゾーン間ごとのエネルギーの授受から温度分布を計算する方法である。最初に、直接交換面積を計算する。直接交換面積は、各ゾーン間の反射を考慮しない放射伝熱の熱交換係数を意味する。

次に直接交換面積から炉内壁面での多重反射を考慮した全交換面積を求める（直接交換面積、全交換面積については 2.2.3 節に詳述）。そして、全交換面積から求まる放射伝熱に、さらに炉内の放射以外の熱移動メカニズムである対流伝熱、燃焼による発熱、ガス流れによる顕熱の移動などを加えて各ゾーンのエネルギーバランス式をたてる。各ゾーンごとのエネルギーバランス式を連立方程式として解くことにより各ゾーンの温度、すなわ

注) ゾーンとは連続量を数値計算上離散化した単位（たとえば、FEM では有限要素、FDM では差分メッシュに対応する）であり炉内の等温とみなすことができる微小な区分。面ゾーンとは炉内壁面および鋼板表面の微小面積、ガスゾーンとは炉内空間の微小立方体を示す。

Fig. 2 Model of non-oxidizing furnace.

Table 1. Basic specification of non-oxidizing furnace.

Furnace shape	Refer to Fig.1
Furnace width × length	1 600mm ^W ×36 000mm ^L
Strip size	0.27mm ^t ×914mm ^W
Line speed	170m/min
Production capacity	19.6t/h
Fuel	Butane air mixed gas(HI=9800 kcal/m ³ N)
Heat input	921×10 ³ kcal/h [No. 8 zone : 456×10 ³ kcal/h No. 9 zone : 465×10 ³ kcal/h]
Combustion air temperature	Ta=180℃
Air ratio	m=0.95
Emissivity	Wall ε = 0.8 Strip ε = 0.3

ち炉内の温度分布を求めることができる。
各ステップにおける計算方法は次に述べる通りであるが、全体のフローチャートを Fig. 3 に示す。

2.2.2 燃焼ガスのモデル化

一般に燃焼ガスはいくつかの波長領域だけで吸収、放射を行う選択放射の性質をもっており、単なる灰色ガス（吸収係数が一定のガス）としては表わせない。そこで、吸収係数の異なる n 種の灰色ガスが混在しているものとして、放射率ε_gは次

式のように表わされる。
$$\epsilon_g = \sum_{i=0}^n a_i (1 - e^{-K_i X}) \dots\dots\dots (1)$$
$$\sum_{i=0}^n a_i = 1 \dots\dots\dots (2)$$
ここで、a_iは各放射領域における吸収係数 K_iに対する重み係数である。X（ガス厚さ）とε_gの関係は種々提示されているが、ここではSchackの式を使用した。
実ガスのデータに基づいて、(1)式のa_i、K_iを算出すると、a_iは温度により変化するが、K_iはほとんど変化しないことがわかる。したがって(1)式はK_iを

一定とし、 a_1 だけを温度の関数として、 $n=2$ として、次のように表わすこととした。

$$\varepsilon_g = a_0(T_g) + a_1(T_g) \cdot (1 - e^{-K_1 X}) + a_2(T_g) \cdot (1 - e^{-K_2 X}) \dots \dots \dots (3)$$

Fig. 3 Flow chart.

ここで、 T_g はガスの絶対温度、 a_0 は透明領域の重み係数である。

2.2.3 直接交換面積と全交換面積

(1) 直接交換面積

ゾーン i から放射したエネルギーのうちゾーン j に到達するエネルギーの割合を示す係数を $i-j$ 間の直接交換面積という。直接交換面積は、黒体表面で囲まれた空間のなかに灰色ガスが充填している場合に相当し、以下のように求めることができる。(Fig. 4 参照)

① 面一面間直接交換面積 ($\overline{S_i S_j}$)

$$\overline{S_i S_j} = \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j e^{-Kr}}{\pi r^2} dA_i dA_j \dots \dots (4)$$

② ガス一面間直接交換面積 ($\overline{g_i S_j}$)

$$\overline{g_i S_j} = \int_{V_i} \int_{A_j} \frac{K \cos \theta_j e^{-Kr}}{\pi r^2} dV_i dA_j \dots \dots (5)$$

③ ガスーガス間直接交換面積 ($\overline{g_i g_j}$)

$$\overline{g_i g_j} = \int_{V_i} \int_{V_j} \frac{K^2 e^{-Kr}}{\pi r^2} dV_i dV_j \dots \dots (6)$$

ここで、 s は面を、 g はガスを表わす。 dA 、 dV はそれぞれ微小面積、微小体積であり、 r はそれらの間の距離である。 θ は r と面の法線のなす角である。

実際の計算では(4)、(5)、(6)式は区分求積法によって求める。

(2) 全交換面積

ある面から放射し面間で多重反射の結果、他の面に到達するエネルギーの割合を示す係数を全交換面積 $\overline{S_i S_j}$ という。

いま壁は灰色であり、ガスも灰色である系の面ゾーン j 上における放射エネルギーバランスを考える。Fig. 5 に示すように、すべての面ゾーンおよびガスゾーンから面ゾーン j に到達するエネルギー

Fig. 4 Direct exchange area between elements.

Fig. 5 Energy balance at surface zone.

一総和を H_j とし、そのうち $\epsilon_j H_j$ は吸収され、 $\rho_j H_j$ は反射されるものとする。 ϵ_j 、 ρ_j はそれぞれ放射率、反射率である。また面ゾーン j は $\epsilon_j E_{s,j}$ で放射しているとすると、 j から射出されるエネルギーフラックス W_j は次のように表すことができる。

$$W_j = \epsilon_j E_{s,j} + \rho_j H_j \quad \cdots \cdots (7)$$

ここで、 $E_{s,j}$ は面ゾーン j における黒体放射エネルギーである。

面ゾーン j に到達するエネルギーフラックスは、すべてのゾーンから放射されるエネルギーフラックスと直接交換面積の積の和となり、次の関係が成り立つ。

$$A_j H_j = \sum_i \overline{S_i S_j} W_i + \sum_l \overline{g_i S_j} E_{g,l} \quad \cdots \cdots (8)$$

したがって、面ゾーン j から放射されるエネルギーは次のように表される。

$$\begin{aligned} A_j W_j &= A_j \epsilon_j E_{s,j} + A_j \rho_j H_j \\ &= A_j \epsilon_j E_{s,j} + \rho_j \left(\sum_i \overline{S_i S_j} W_i + \sum_l \overline{g_i S_j} E_{g,l} \right) \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

(9)の式は、空間内の面ゾーン j における放射エネルギーのバランスを示しており、書き直すと次のようになる。

$$\begin{aligned} \sum_i (\overline{S_i S_j} - \delta_{ij} \frac{A_j}{\rho_j}) W_i &= - \frac{A_j \epsilon_j E_{s,j}}{\rho_j} \\ &- \sum_l \overline{g_i S_j} E_{g,l} \cdots \cdots (10) \end{aligned}$$

$$i = j \text{ のとき, } \delta_{ij} = 1$$

$$i \neq j \text{ のとき, } \delta_{ij} = 0$$

(10)式は、すべての面ゾーンにおいて成り立ち、 n 個の連立方程式となるが、これをもとにして以下のように全交換面積が求められる。

①ガス一面間全交換面積 ($\overline{G_i S_j}$)

$$\overline{G_i S_j} = \frac{A_j \epsilon_j}{\rho_j} g_{j,i} W_j \quad \cdots \cdots (11)$$

$g_{j,i} W_j$ は(10)式で $E_{g,i} = 1$ とし、他の E_g および E_s を0

として求めることができる。

②面一面間全交換面積 ($\overline{S_i S_j}$)

$$\overline{S_i S_j} = \frac{A_j \epsilon_j}{\rho_j} (g_{j,i} W_j - \delta_{ij} \epsilon_j) \quad \cdots \cdots (12)$$

$g_{j,i} W_j$ は(10)式で $E_{s,i} = 1$ とし、他のすべての E_s および E_g を0として求めることができる。

③ガスーガス間全交換面積 ($\overline{G_i G_j}$)

$$\overline{G_i G_j} = \overline{g_i g_j} + \sum_k \overline{S_k g_i} \cdot g_{j,k} W_k \quad \cdots \cdots (13)$$

(3) 方向性全交換面積

次に、灰色ガスの場合の全交換面積に基いて、実ガスの全交換面積、すなわち方向性全交換面積

($\overrightarrow{S_i S_j}$, $\overrightarrow{S_i G_j}$, $\overrightarrow{G_i S_j}$, $\overrightarrow{G_i G_j}$) を求める。

$$\overrightarrow{S_i S_j} = \sum_{k=0}^n [(a_{s,k}(T_{s,i}))](\overline{S_i S_j})_k \quad \cdots \cdots (14)$$

$$\overrightarrow{S_i G_j} = \sum_{k=0}^n [a_{s,k}(T_{s,i})](\overline{S_i G_j})_k \quad \cdots \cdots (15)$$

$$\overrightarrow{G_i S_j} = \sum_{k=0}^n [(a_{g,k}(T_{g,i}))](\overline{G_i S_j})_k \quad \cdots \cdots (16)$$

$$\overrightarrow{G_i G_j} = \sum_{k=0}^n [a_{g,k}(T_{g,i})](\overline{G_i G_j})_k \quad \cdots \cdots (17)$$

方向性全交換面積は、放射源の温度の関数となる。

2.2.4 全エネルギーバランス

前述の方向性全交換面積により各ゾーン間の放射エネルギーの交換量が求まる。しかし炉内には放射伝熱のほかに、対流伝熱、燃焼による発熱、ガス顕熱の移動などの熱的現象もある。したがって各ゾーンの温度分布は、これらのすべての熱的現象を含めた全エネルギーバランス式により求められる。

①面ゾーンにおけるエネルギーバランス

面ゾーン i におけるエネルギーバランスは次のようになる。

$$\begin{aligned} \sum_j \overrightarrow{S_j S_i} E_{s,j} + \sum_j \overrightarrow{G_j S_i} E_{g,j} - A_i \epsilon_i E_{s,i} + \alpha_i A_i (T_{g,k} \\ - T_{s,i}) = \dot{Q}_{net,i} \cdots \cdots (18) \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha_i A_i (T_{g,k} - T_{s,i})$ 項は隣接するガスゾーン k から面ゾーン i への対流熱移動を示し、 $\dot{Q}_{net,i}$ は炉壁からの放散熱量あるいは鋼板への正味伝熱量を示す。

②ガスゾーンにおけるエネルギーバランス

ガスゾーン i におけるエネルギーバランスは、次のようになる。

$$\begin{aligned} \sum_j \overrightarrow{G_j G_i} E_{g,j} + \sum_j \overrightarrow{S_j G_i} E_{s,j} - 4 \sum_n a_{g,n} K_n V_i E_{g,i} + \dot{Q}_{e,i} \\ + \dot{Q}_{f,i} = 0 \cdots \cdots (19) \end{aligned}$$

Table 2. Discharge temperature of model furnace.

Furnace width (mm)	Furnace length (mm)	Furnace height (mm)		Strip width (mm)	Emissivity(-)		Discharge temperature (°C)
		H ₁	H ₂		Strip	Wall	
1 600	36 000	400	1 100	914	0.3	0.80	571.8

Table 3. Effect of furnace height on discharge temperature.

Furnace width (mm)	Furnace length (mm)	Furnace height (mm)		Strip width (mm)	Emissivity(—)		Discharge temperature (°C)
		H ₁	H ₂		Strip	Wall	
1 600	36 000	400	1 100	914	0.3	0.80	571.8
		1 100					566.9
		1 300					564.9
		900					567.7

ここで、 $\dot{Q}_{e,i}$ はガスゾーンを流れるガスの顕熱の移動量に、隣接面ゾーンからの対流熱移動量を加えたものを示し、 $\dot{Q}_{t,i}$ は燃焼による発熱量を示す。

エネルギーバランス式は温度の5次以上の連立方程式となる。ここでは反復法により計算した。

このプログラムは約3500ステップであり、計算時間の一例を示せば約16分であった。

3. 計算結果

CGLの伝熱効率に影響を与えるパラメータとして多くのものが考えられる。ここでは、そのなかでも特に大きな要因と考えられる炉の高さ、放射率、燃料、空気比、鋼板の板幅についてパラメータを変化させて、その影響を調べた。比較の方法としては3.6節の板幅による影響を除いて、炉への投入熱量を一定とし、鋼板の抽出温度の比較を行っている。抽出温度が高いということは、炉内の伝熱効率が高いことを示し、抽出温度を一定とした場合には炉の原単位が低くなることを示している。

3.1 モデル炉計算結果

Table 1 に示したモデル炉の計算結果を Table 2 に示す。また、Fig. 6 にこの場合の計算加熱曲線を示した。

3.2 炉高の影響

上記のモデル炉で高さを変えた場合に鋼板の抽

Fig. 6 Example of temperature distribution of gas and wall surface and heating curve of strip.

出温度がどのように変化するか計算した。炉の高さは全炉長で一定の高さとし、モデル炉より高い場合と低い場合の両方のケースで計算した。

この計算結果から炉の高さは Table 3 に示す計算範囲内では伝熱効率にあまり大きな影響を与えないが、高すぎると抽出温度がさがって伝熱効率が悪くなることがわかる。また、モデル炉のように PHF 部の高さを低くした場合の抽出温度が最も高いことがわかる。これは、NOF 部に比べて PHF 部の天井が低いため、高温部(燃焼ゾーン)である NOF 部から低温部である PHF 部への放射

Table 4. Effect of emissivity on discharge temperature.

Furnace width (mm)	Furnace length (mm)	Furnace height (mm)		Strip width (mm)	Emissivity(—)		Discharge temperature (°C)
		H ₁	H ₂		Strip	Wall	
1 600	36 000	400	1 100	914	0.3	0.80	571.8
					0.3	0.60	569.5
					0.3	0.90	572.7
					0.25	0.80	559.9
					0.35	0.80	582.4

Table 5. Effect of fuel on discharge temperature.

Furnace width (mm)	Furnace length (mm)	Furnace height (mm)		Strip width (mm)	Fuel	Discharge temperature (°C)
		H ₁	H ₂			
1 600	36 000	400	1 100	914	APG	571.8
					COG	572.2

Table 6. Effect of air ratio on discharge temperature.

Furnace width (mm)	Furnace length (mm)	Furnace height (mm)		Strip width (mm)	Air ratio (—)	Discharge temperature (°C)
		H ₁	H ₂			
1 600	36 000	400	1 100	914	0.9	550.8
					0.95	571.8
					0.98	584.3

伝熱量が少なくなり、NOF部のガスおよび壁面が高温に保たれるためと思われる。一般に加熱側温度が高温のほど伝熱効率が良いと言われている。

3.3 放射率の影響

炉壁および鋼板の放射率を変えて抽出温度を求めた結果を Table 4 に示す。

Table 4 の結果から、炉壁の放射率は炉の伝熱効率にあまり影響を与えないが、炉壁の放射率が高い方が伝熱効率が良くなることがわかる。また、鋼板の放射率は炉の伝熱効率に大きな影響をおよぼし、当然のことながら、放射率が高い方が伝熱効率が良くなっている。

3.4 燃料の種類による影響

モデル炉の燃料はブタンエアミックスガス (APG) であるが、伝熱効率を比較するために COG の場合の抽出温度を求めた結果を Table 5

に示す。

APG と COG の投入熱量が同じになるようにして計算したものであるが、両者の伝熱効率はずっと変わらないことがわかる。

3.5 空気比の影響

燃料投入量を一定として、空気比を変化させた場合の鋼板の抽出温度の違いを求めた。その結果は Table 6 に示す通りである。

3.6 鋼板の板幅変化の影響

炉内幅は一定とし、板幅が変化した場合の抽出温度の違いを求めた。この場合、ラインスピードは一定とし、燃料の投入量は板幅に比例するものとした。

Table 7 の結果より、カバーレシオの高くなる板幅の広い場合の方が抽出温度が高くなることがわかる。これは、側壁に近い部分の鋼板の全交換

Table 7. Effect of strip width on discharge temperature.

Furnace width (mm)	Furnace length (mm)	Furnace height (mm)		Strip width (mm)	Emissivity(—)		Discharge temperature (°C)
		H ₁	H ₂		Strip	Wall	
1 600	36 000	400	1 100	600	0.3	0.8	551.8
				914			571.8
				1 250			581.7

面積が大きいことが、平均の抽出温度を高くしているためである。

燃料投入量を一定とした場合の空気比の変化は、燃焼により発生する熱量が変わってくるために、鋼板の抽出温度に非常に大きな影響を与えることがわかる。当然の結果ながら、空気比が1に近いほど抽出温度が高くなる。

4. 結 言

ゾーン法による連続亜鉛メッキ設備の無酸化炉の伝熱解析用プログラムを開発し、各種の計算を行った。計算例では、炉の高さ、放射率、燃料、空気比、鋼板の板幅のパラメータを変化させ、それによる抽出温度の違いを述べた。

連続亜鉛メッキ設備の設計にあたっては、本プログラムを用いて最適設計を行うことが可能であり、省エネルギーとコストダウンに力を発揮する

ものと思われる。今後、さらに板厚方向の温度分布計算を取り入れれば連続鋼片加熱炉についての解析もでき、本プログラムは連続炉全般についての有効な設計手段となり得るであろう。

本業務の遂行にあたり、御指導をいただいた大同特殊鋼中央研究所、渡辺一雄工学博士、ならびに多大の御協力をいただいた同機械事業部設計部、松村一郎、俵博の各氏に深く感謝します。

(文 献)

- 1) H.C. Hottel, and A.F. Sarofim: Radiative Transfer, (1967), [McGraw-Hill]
- 2) 杉山峻一, 阿部正広: 鉄と鋼, 67 (1981) 4, S 362
- 3) 日本鉄鋼協会共同研究会, 熱経済技術部会, 加熱炉伝熱研究小委員会: 加熱炉炉内伝熱解析法の基礎と応用, (1982), [日本鉄鋼協会]