

© 1989 ISIJ

 ////////////////  
 論 文  
 ////////////////

# 転炉内のガス流れと熱および物質移動の解析

 加藤嘉英\*・Jean-Claude GROSJEAN\*<sup>2</sup>  
 Jean-Pierre REBOUL\*<sup>2</sup>・Paul RIBOUD\*<sup>2</sup>

## Theoretical Study on Gas Flow and Heat and Mass Transfer in a Converter

 Yoshiei KATO, Jean-Claude GROSJEAN,  
 Jean-Pierre REBOUL and Paul RIBOUD

### Synopsis :

Theoretical study was made and its result was compared with hot model experiment in order to understand gas flow, and heat and mass transfer in the converter with a top blowing lance.

The experiment was made in a 200 kg high frequency induction furnace equipped with a oxygen lance. Post combustion ratio,  $\gamma$ , measured by a mass spectrometer increases with increase in lance height and decrease in oxygen flow rate. Transfer efficiency,  $\eta_H$ , of reaction heat of CO and CO<sub>2</sub> formation to metal bath decreases with increasing  $\gamma$ .

Two dimensional equations of continuity, conservation for momentum, enthalpy and gas species were solved numerically under the condition that the reaction rate at a fire spot is controlled by diffusion in a gas phase. The ad hoc model was used for the calculation of effective viscosity. The values of  $\gamma$  and  $\eta_H$  computed under the constant heat and mass transfer coefficients agree with the measured ones except for the effect of oxygen gas flow rate on  $\eta_H$ .

The computed profiles of physical quantities indicate as follows : The gradients of temperature and concentrations between the lance tip and the depressed surface of metal bath were steeper than those in the other region. The maximum temperature and CO<sub>2</sub> concentration are in the recirculating flow zone located between the lance tip and the depressed surface.

Key words : basic oxygen steelmaking ; post combustion ; converter ; lance.

## 1. 緒 言

近年、転炉におけるスクラップの大量使用<sup>1)</sup>や鉍石の溶融還元技術<sup>2)</sup>の発展に伴い、転炉での二次燃焼技術が重要視されている。岡村ら<sup>3)</sup>および高柴ら<sup>4)</sup>は二次燃焼率と溶鉄への着熱量を向上させるために上吹きランスにそれぞれ形状の異なる副孔を取りつけて実験を行った。一方、著者ら<sup>5)</sup>も二次燃焼率におよぼす上記ランスの操業要因の影響を擬次元モデルで解析した。石川ら<sup>6)</sup>は試験脱炭炉での熱、物質収支を解析し、溶鋼への着熱効率が二次燃焼率の増加とともに低下することを示した。また、平居ら<sup>7)</sup>は二次燃焼メカニズムに関して、上吹きジェット外周部の酸素が周囲のCOと反応してCO<sub>2</sub>となり、そのまま系外へ去るとしたモデルを提示し、実測値と対応させた。

一方、二次燃焼メカニズムを解明するためには転炉内でのガス流れとそこでの熱、物質移動を把握する必要がある。しかし、これまでの研究は自由噴流モデル<sup>5)7)~10)</sup>に限定されており、転炉内の反応を伴うガス流れを解析した例は見あたらない。転炉でのガス流れは上吹きランスからのO<sub>2</sub>ジェットが鋼浴面と衝突し反転するので循環流を形成する。燃焼を伴う循環流の例として、燃焼ガスを周囲の空気の流れとは反対方向に噴射するOpposed jet<sup>11)~13)</sup>がある。Opposed jetは放物面状の燃焼面が転炉における火点と類似しているが、燃焼に必要な空気を量論比以上に流し、しかも溶鋼などの液体が関与しない燃焼界面となるので転炉空間の熱、物質移動に直接適用することは困難である。

そこで、二次燃焼メカニズムを知る一環として、転炉におけるスラグミニマム吹錬時を想定した高周波炉によ

昭和 62 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 63 年 5 月 18 日受付 (Received May 18, 1988)

\* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

\*2 IRSID Maisière-lès-Metz

る模擬実験を行つて、操作要因におよぼすガス組成と溶鉄への着熱効率の影響を調べるとともに、上記系でのガスのフローパターン、濃度および温度分布を数値計算し実測値との対応を検討した。

## 2. 実 験

### 2.1 実験方法

実験に用いた高周波炉の概略図を Fig. 1 に示す。炉内径 0.35 mφ、高さ 0.7 m で、その上に空気の巻込みを防ぐための耐火物内張り製カバー（高さ 0.2 m）を置いた。O<sub>2</sub> 吹錬用上吹きランスは単孔のステンレス管製（内径 0.006 mφ）で、まわりを Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> コーティングすることによつて外径を 0.04 mφ とした。ガスサンプリング管は水冷で先端に長さ 0.1 m、内径 0.012 mφ、外径 0.016 mφ のアルミナ管を取りつけた。炉内ガス吸引時のアルミナ管の先端は溶鉄の静止浴面から 0.3 m 上、炉壁から軸心方向に 0.08 m の位置とした。溶解量は 180~200 kg で実験前の組成は 2.8 ≤ [% C] ≤ 4.0, [% Si] ≤ 0.036, 0.05 ≤ [% Mn] ≤ 0.27, 0.015 ≤ [% P] ≤ 0.035, [% S] ≈ 0.2, 温度は 1380 ± 20°C とした。

実験の手順を以下に示す。溶鉄の温度変化が ±1°C/min 以内となるように高周波炉の電力を調整する。溶鉄表面のスラグを除去した後、上吹きランスを炉心軸上の所定の位置まで挿入し、ただちに吹錬をはじめ。この時、炉底中心のポーラスプラグから 9.6 × 10<sup>-3</sup> Nm<sup>3</sup>/min の Ar を吹き込む。実験中の高周波電力は実験前に調整した値と同一である。炉内へのガスサンプリング管の挿入は、溶鉄の飛散によるつまりを極力防止するために、O<sub>2</sub> 吹錬開始後 2.5 min で行つた。ガスの吸引流量は 0.02 Nm<sup>3</sup>/min とした。この時、サンプリ

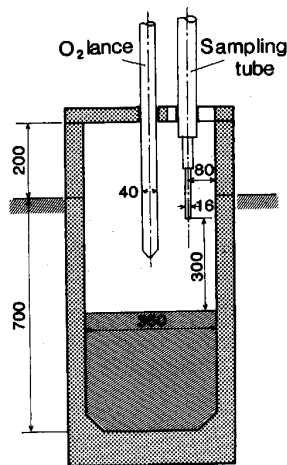


Fig. 1. Schematic representation of the experimental apparatus.

ング管から質量分析計（Perkin-Helmer 製）までのガス通過時間は約 30 s であつた。1 回の実験は約 4 min で、その前後に測温とメタルおよびスラグを採取した。実験は O<sub>2</sub> 流量を 0.25, 0.33, 0.42, 0.5 Nm<sup>3</sup>/min の 4 とおり、ランス高さを 0.1, 0.2, 0.3 m の 3 とおり変えて行つた。

### 2.2 実験結果

Fig. 2 に各ガス成分の経時変化の一例を示す。ガスサンプリング管を炉内に挿入する前は空気を吸引するために空気と同一ガス組成である。サンプリング開始後約 30 s で各成分ともに一定値となる。また、炉内で N<sub>2</sub> が検知されないことから空気の巻込みはないと判断した。

#### 2.2.1 二次燃焼率におよぼす O<sub>2</sub> 流量およびランス高さの影響

Fig. 3 に二次燃焼率,  $\gamma = \frac{(\% \text{CO}_2)}{(\% \text{CO}_2) + (\% \text{CO})}$ , と O<sub>2</sub> 流量, Q<sub>O<sub>2</sub></sub> (Nm<sup>3</sup>/min), の関係を示す。ランス高さ, H<sub>0</sub> (m), は 0.2 m 一定で図中の実線は第 4 章で述べる計算値を示す。0.33~0.5 Nm<sup>3</sup>/min の範囲では顕著でないものの、全体として Q<sub>O<sub>2</sub></sub> が減少するほど  $\gamma$  が大きくなる。

$\gamma$  と H<sub>0</sub> の関係を Fig. 4 に示す。Q<sub>O<sub>2</sub></sub> は 0.5 Nm<sup>3</sup>/min 一定で、Fig. 3 と同様に図中の実線は後述の計算値を示す。ランス高さを大きくするほど  $\gamma$  は増加する。

Fig. 3, 4 の関係を統一的に説明するために、くぼみ

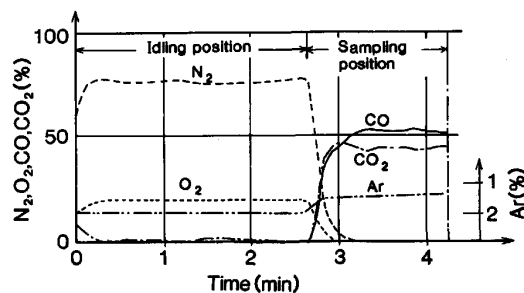


Fig. 2. Typical example of time change of gas concentrations in the furnace.

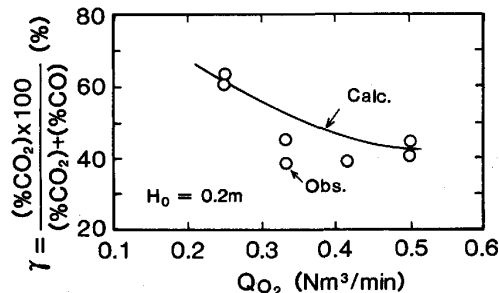


Fig. 3. Relation between post combustion ratio and oxygen flow rate for lance height of 0.2m (plots : measured, line : computed).

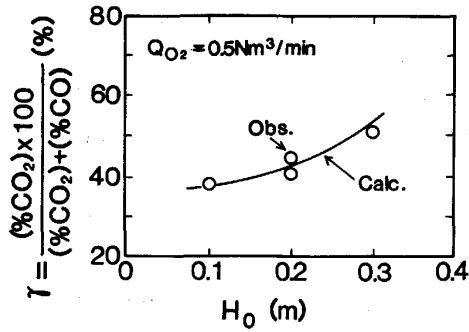


Fig. 4. Relation between post combustion ratio and lance height for oxygen flow rate of 0.5 Nm<sup>3</sup>/min (plots : measured, line : computed).

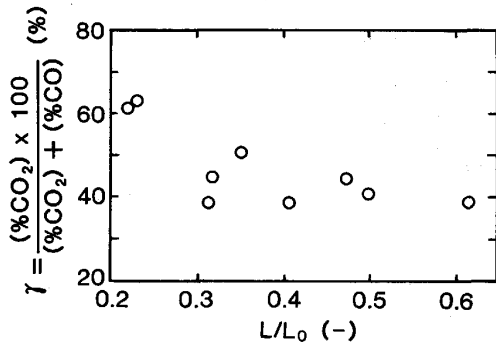


Fig. 5. Relation between post combustion ratio and depressed depth normalized by bath depth.

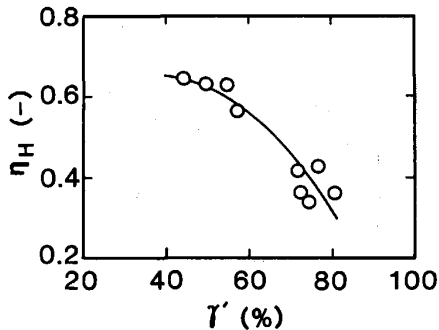


Fig. 6. Relation between heat efficiency of the reaction for formations of CO and CO<sub>2</sub> as defined in eq. (3) and post combustion ratio at the furnace mouth as defined in eq. (4).

深さ,  $L(m)$ , を計算し,  $\gamma$  と  $L$  の関係を Fig. 5 に示す. なお,  $L$  は次式から求めた<sup>14)</sup>.

$$L = L_h \exp(-0.78 H_0 / L_h) \dots\dots\dots (1)$$

$$L_h = 0.0411 (Q_{O_2} / d)^{2/3} \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 5 から, ばらつきがあるものの  $L$  が浅くソフトブローとなるほど  $\gamma$  は大となることがわかる. これは従来の知見<sup>6)</sup> が示す傾向と同じである.

2.2.2 溶鉄への着熱効率と二次燃焼率の関係  
溶鉄への着熱効率,  $\eta_H$  を(3)式で定義する.

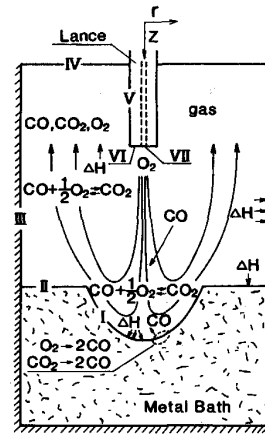


Fig. 7. Schematic representation of heat and mass transfer in a gas flow in the furnace.

$$\eta_H = (\Delta H_{steel} - \sum_i \Delta H_i \cdot \Delta i) / \{ \Delta C (\Delta H_{C-co} + \gamma' \Delta H_{co-co_2}) \} \dots\dots\dots (3)$$

上式は  $C + (1/2)O_2 \rightarrow CO$ ,  $CO + (1/2)O_2 \rightarrow CO_2$  の反応熱が溶鉄へ伝わる割合を意味しており, 溶鉄中の Si, Mn, P, Fe の酸化反応熱はすべて溶鉄に伝わるとした. (3)式中の  $\gamma'$  は実験全区間の  $O_2$  バランスから求めた平均の2次燃焼率であり, 次式から求めることができる.

$$\gamma' = 2 \{ Q_{O_2} (t - t_s) - \sum_i O_{2i} \} / \{ \Delta C (22.4 / 12) \} \dots\dots\dots (4)$$

ここで, 着火時間,  $t_s$ (min), まだに炉内に入った  $O_2$  は反応に寄与しないとした.  $t_s$  は各実験ごとに測定した.

$\eta_H$  と  $\gamma'$  の関係を Fig. 6 に示す.  $\gamma'$  が増加するにつれて  $\eta_H$  が低下しており, 従来の傾向<sup>6)7)</sup> と同様である.

### 3. 理論解析

#### 3.1 主な仮定と基礎式

転炉内空間における熱, 物質移動の模式図を Fig. 7 に示す. 上吹きランスから噴射された  $O_2$  ジェットは周囲の  $CO + CO_2$  を巻き込み,  $CO$  と反応しながら鋼浴面(火点)に衝突する. 火点では  $O_2$ ,  $CO_2$  が鋼浴中の  $C$  と反応して  $CO$  ガスが生成する. ガスは火点と衝突後, 反転して系外に逸散するが, 一部は  $O_2$  ジェット中に巻き込まれる. 一方, ガスから鋼浴面および炉壁に向かって熱移動が生じる.

このようなガス流れを数式化するに際して以下の仮定を設ける.

1) 乱流プラントル数 ( $Pr$ ) と乱流シュミット数 ( $Sc$ ) はともに1とする.

2) 気-液界面の反応はくぼみ部のみで生じ, 反応速度はガス側物質移動に律速される.

3) 空間では  $\text{CO} + (1/2)\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$  の平衡が成り立つ。

各収支式は以下のとおりである。

連続の式：

$$\frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho V_r)}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

z, r 方向の運動量収支式：

$$\rho \left( V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) = - \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (6)$$

$$\rho \left( V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) = - \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (7)$$

ここで、

$$\tau_{zz} = -2\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z}, \quad \tau_{rz} = -\mu_e \left( \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right),$$

$$\tau_{rr} = -2\mu_e \frac{\partial V_r}{\partial r} \quad (8)$$

エンタルピー収支式：

$$\rho \left( V_z \frac{\partial h}{\partial z} + V_r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = - \frac{\partial J_{h,z}}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial(rJ_{h,r})}{\partial r} \quad (9)$$

ここで、

$$h = C_p(T - T_r) + H_c x_{\text{O}_2} \quad (10)$$

$$J_{h,z} = -\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial z}, \quad J_{h,r} = -\frac{\partial h}{\partial r} \quad (11)$$

各ガス種についての物質収支式：

$$\rho \left( V_z \frac{\partial x_j}{\partial z} + V_r \frac{\partial x_j}{\partial r} \right) = - \frac{\partial J_{j,z}}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial(rJ_{j,r})}{\partial r} + R_j \quad (12)$$

$$J_{j,z} = -\Gamma_j \frac{\partial x_j}{\partial z}, \quad J_{j,r} = -\Gamma_j \frac{\partial x_j}{\partial r} \quad (13)$$

(12)式は(14)式を用いて(15)式のように書きかえられる。

$$R_{\text{O}_2} / 16 = R_{\text{CO}} / 28 \quad (14)$$

$$\rho \left( V_z \frac{\partial X}{\partial z} + V_r \frac{\partial X}{\partial r} \right) = - \frac{\partial J'_{j,z}}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial(rJ'_{j,r})}{\partial r} \quad (15)$$

ここで、

$$X = x_{\text{O}_2} - (16/28)x_{\text{CO}} \quad (16)$$

$$J'_{j,z} = -\Gamma_j \frac{\partial X}{\partial z}, \quad J'_{j,r} = -\Gamma_j \frac{\partial X}{\partial r} \quad (17)$$

$\text{O}_2 - \text{CO} - \text{CO}_2$  の平衡関係<sup>15)</sup>：

$$\log \left( \frac{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}}{P_{\text{CO}_2}} \right) = - \frac{14760}{T} + 4.54 \quad (18)$$

また、仮定1) から(19)式が成り立つ。 $\mu_e$  は(20)式のように ad hoc モデル<sup>16)</sup>で計算する。

$$\mu_e = \Gamma_h = \Gamma_j \quad (19)$$

$$\mu_e = 0.012 D^{2/3} H^{-1/3} \rho^{2/3} (\dot{m} V_{z,i}^2)^{1/3} \quad (20)$$

### 3.2 境界条件

境界 I ~ VII を Fig. 7 に示す。

境界 I (くぼみ部)：

L は(1)~(2)式で与えられるが、くぼみ部の形状は伊東ら<sup>17)</sup>のように放物面で近似する。

$$L = ar^2 \quad (21)$$

a も伊東ら<sup>17)</sup>の考え方をさらに簡略化して、ガスジェット出口での単位時間あたりの運動量とくぼみ部がガスに与える垂直方向の体積力のつりあいから(22)式で求める。

$$\dot{m} V_{z,i} = \rho_i g \int_0^L \Pi r^2 dy = \Pi \rho_i g L^2 / 2a \quad (22)$$

くぼみ部での熱、物質移動速度は前節の仮定2)を用いればそれぞれ次式のようになる<sup>18)</sup>。

$$-\Gamma_h C_p \frac{\partial T}{\partial n} + C_p (T - T_M) \sum_i n_i = h_t (T - T_M) \quad (23)$$

$$-\Gamma_j \frac{\partial x_j}{\partial n} + \sum_i n_i (x_j - x_{j,s}) = k_t (x_j - x_{j,s}) \quad (24)$$

ここで、 $h_t$  は(25)式のように対流と輻射の和とし、 $h_r$  は(26)~(27)式<sup>19)</sup>によつて求める。

$$h_t = h_r + h_c \quad (25)$$

$$h_r = 4.88 \alpha F_{AE} \{ (T/100)^4 - (T_M/100)^4 \} / (T - T_M) \quad (26)$$

$$F_{AE} = e_c e_g / \{ 1 - (1 - e_c)(1 - e_g) \} \quad (27)$$

くぼみ部の気-液界面での温度、成分は次式で与える。

$$T = T_M, \quad x_{\text{O}_2,s} = 0, \quad x_{\text{CO},s} = 1, \quad x_{\text{CO}_2,s} = 0 \quad (28)$$

境界 II (浴表面部)：

物質移動はなく、熱移動も輻射のみとする。

$$-\Gamma_h C_p \frac{\partial T}{\partial z} = h_r (T - T_M), \quad \frac{\partial x_j}{\partial z} = 0 \quad (29)$$

境界 III (炉壁部)：

熱、物質移動を境界 II と同様の条件とする。

$$-\Gamma_h C_p \frac{\partial T}{\partial r} = h_r (T - T_R), \quad \frac{\partial x_j}{\partial r} = 0 \quad (30)$$

境界 IV (炉口部)：

軸方向の勾配がないとする。

$$\partial \phi / \partial z = \partial w / \partial z = \partial T / \partial z = \partial x_j / \partial z = 0 \quad (31)$$

境界 V (ランス側面部)：

ランス冷却水による吸熱が存在するが、発生熱量に対して無視できると仮定する。

$$\partial T / \partial r = \partial x_j / \partial r = 0 \quad \dots\dots\dots (32)$$

境界 VI (ランス先端部) :

$$\partial T / \partial z = \partial x_j / \partial z = 0 \quad \dots\dots\dots (33)$$

境界 VII (ガス出口) :

$$T = 273 \text{ K}, \quad x_{O_2} = 1, \quad x_{CO} = x_{CO_2} = 0 \quad \dots\dots\dots (34)$$

3.3 熱、物質移動係数の設定

3.1 節の仮定 1) のように  $Pr$  数と  $Sc$  数がともに 1 の条件では熱、物質移動の相似から  $Nu$  数と  $Sh$  数が等しいので、次式が成り立つ。

$$h_c / k_t = \lambda / dl \quad \dots\dots\dots (35)$$

(35)式に 1873 K における  $CO_2$  50%- $CO$  50% 混合ガスの物性値  $\lambda = 3.4 \times 10^{-5} \text{ kcal/m}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$ ,  $dl = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  を代入すると、

$$h_c / k_t = 0.09 \quad \dots\dots\dots (35')$$

となる。したがって(25)式は以下のように書きかえられる。

$$h_t = 0.09 k_t + \alpha' \{ (T/100)^4 - (T_M/100)^4 \} / (T - T_M) \quad \dots\dots\dots (25')$$

本計算では基準条件を  $Q_{O_2} = 0.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ ,  $H_0 = 0.2 \text{ m}$  とし、そこでの  $\gamma$  および  $\eta_H$  の計算値が実測値と合うように  $k_t$ ,  $\alpha'$  を定めた。  $Q_{O_2}$ ,  $H_0$  を変えた条件でも  $k_t$ ,  $\alpha'$  の値は一定とした。

3.4 計算手順

数値解は GOSMAN *et al.*<sup>20)</sup> の手法によつて収支式 (1) ~ (3) を流れ関数  $\psi$  と渦度  $w$  に関する式に変換し、  $h$  と  $X$  に関する収支式 (5), (10) を加えた合計 4 式を差分化して繰り返し計算を行うことによつて求めた。  $x_{O_2}$  は各点での  $X$  と  $h$  の計算後(18)式を試行錯誤法で解き次のステップの値とした。

収束判定条件は (36)式によつた。

$$| \phi_{i,j}^{(k+1)} - \phi_{i,j}^{(k)} | / | \phi_{i,j}^{(k+1)} | \leq 10^{-4} \quad \dots\dots\dots (36)$$

$z$  方向に 37~42,  $r$  方向に 39~40 と分割する格子点を採用した。

4. 計算結果と考察

4.1 実測値との対応

( $z, r$ ) = (0.3, 0.095) での二次燃焼率の計算値を実測値と比較して Fig. 3~4 に示す。 Fig. 3 の基準条件は  $Q_{O_2} = 0.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ , Fig. 4 のそれは  $H_0 = 0.2 \text{ m}$  である。 Fig. 3 の  $Q_{O_2} = 0.33, 0.42 \text{ Nm}^3/\text{min}$  では計算値が実測値よりやや大きいものの他の条件ではよく一致している。

Fig. 8 に溶鉄への着熱効率の計算値,  $(\eta_H)_{\text{calc.}}$  と実験

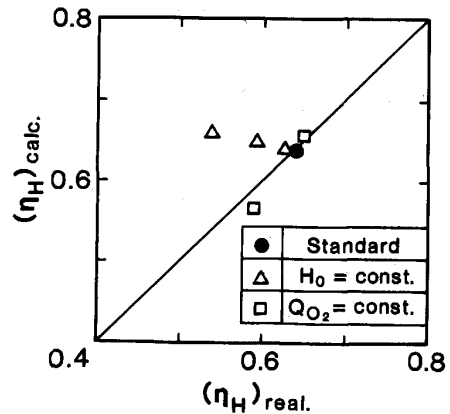


Fig. 8. Comparison between the computed and measured values of heat efficiency of the reaction for formations of  $CO$  and  $CO_2$  transferred to metal bath.

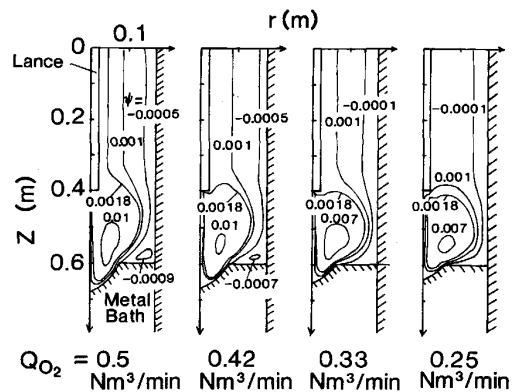


Fig. 9. Contours of stream function (oxygen flow rate :  $0.25 \sim 0.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ , lance height :  $0.2 \text{ m}$ ).

値,  $(\eta_H)_{\text{real}}$  の関係を示す。  $(\eta_H)_{\text{real}}$  は  $\gamma'$  の計算値から Fig. 6 の関係を用いて求めた。当然ながら  $Q_{O_2} = 0.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ ,  $H_0 = 0.2 \text{ m}$  の基準条件では  $(\eta_H)_{\text{calc.}}$  と  $(\eta_H)_{\text{real}}$  が等しく、  $Q_{O_2}$  を一定として  $H_0$  を変えた場合も比較的良く一致する。しかし、  $H_0$  を一定とし  $Q_{O_2}$  を小さくした場合、  $(\eta_H)_{\text{real}}$  は  $\gamma'$  が大となるので小さくなるが、図からわかるように  $(\eta_H)_{\text{calc.}}$  は逆に大きくなる。この理由は  $Q_{O_2}$  を小さくすることによつて反応熱、すなわち  $\Delta C(\Delta H_{c \rightarrow co} + \gamma' \Delta H_{co \rightarrow co_2})$  も小さくなるのに対して、(25)'式の  $k_t$  および  $\alpha$  が一定のために炉内空間から溶鉄への熱伝達速度に顕著な差が見られないためである。

KATAOKA *et al.*<sup>21)</sup> は高温のガスジェットを銅板に垂直に噴射した実験を行い、  $h_c$  がガス流量を小さくするほど、またランス高さを高くするほど小さくなることを示した。このように伝熱係数を変化させると、着熱効率に関する計算結果と実測値の傾向は同じになると思われ

る。しかし、二次燃焼率やランス高さの影響をみた場合の着熱効率に関する計算結果と実測値の間に矛盾が生じることになる。本計算の精度向上のためには、液面に衝突するジェットの手動を正確に把握し、熱、物質移動速度定数に関する相関式を作成する必要があると思われる。

4.2 フローパターン、ガス成分および温度分布におよぼすガス流量とランス高さの影響

4.2.1 フローパターン

Fig. 9 に  $H_0$  が一定の条件で  $Q_{O_2}$  を変化させた場合の等流れ関数線図を示す。各条件ともにランス先端とくぼみ部間に反時計まわりの循環流(A)があり、さらに低  $Q_{O_2}$  領域では示していないが炉壁と溶鉄の表面近傍に時計まわりの循環流(B)が存在する。 $Q_{O_2}$  を増すにつれて循環流(A)は  $z$  方向にのび、しかも循環流(B)の範囲も広がる。これはくぼみ深さが大きくなるとともに、くぼみ部と溶鉄の表面 ( $z = 0.6$  m) の交点におけるくぼみ面の傾きが増し、反転流がそれに沿って流れるためである。

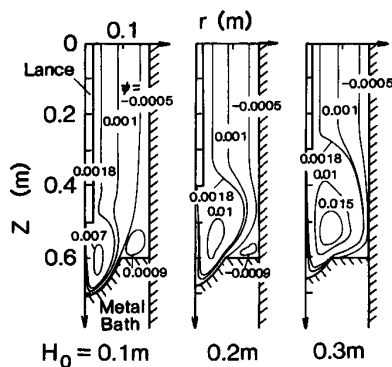


Fig. 10. Contours of stream function (lance height: 0.1~0.3 m, oxygen flow rate: 0.5 Nm<sup>3</sup>/min).

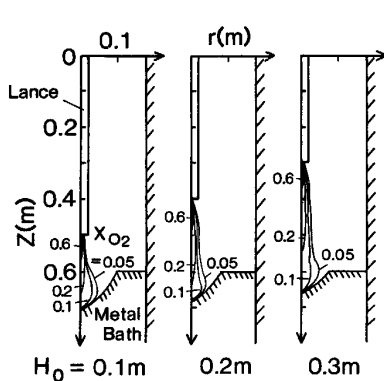


Fig. 11. Contours of mass fraction of oxygen (lance height: 0.1~0.3 m, oxygen flow rate: 0.5 Nm<sup>3</sup>/min).

Fig. 10 に  $Q_{O_2}$  を一定とし  $H_0$  を変えた場合の等流れ関数線図を示す。 $H_0$  が大きいほど循環流(A)の範囲は広がる。循環流(B)は  $H_0$  が小さく、くぼみ深さが大きいほど大となる。

4.2.2 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO の濃度分布

$H_0$  を変えた条件での等  $x_{O_2}$  線図を Fig. 11 に示す。ランス先端から約 0.07 m 下方で  $x_{O_2}$  は 0.6 に低下する。くぼみ部近傍の等  $x_{O_2}$  線はくぼみ面に沿った反転流のために半径方向にふくらみをもつ。図示しないが、上記傾向は  $Q_{O_2}$  を変えた場合も同様である。

Fig. 12 に等  $x_{CO_2}$  線図を、 $Q_{O_2}$  を変えて示す。等  $x_{CO_2}$  線は 0.05 ごとに上限値まで図示した (以下、等  $x_{CO_2}$ ,  $x_{CO}$  線に関して同様)。ランス先端とくぼみ部間の循環流(A)領域に  $x_{CO_2}$  が最大となる範囲があり、その値は  $Q_{O_2}$  が小さくなるにつれて大きくなる。また、炉壁近傍およびランス先端より上方では  $x_{CO_2}$  の変化が少ないことも知られる。前節で述べたように、系の出側 ( $z = 0$  m) での  $x_{CO_2}$  は  $Q_{O_2}$  が大きいほど大となる。くぼみ部と溶鉄の表面 ( $z = 0.6$  m) の交点付近での  $x_{CO_2}$

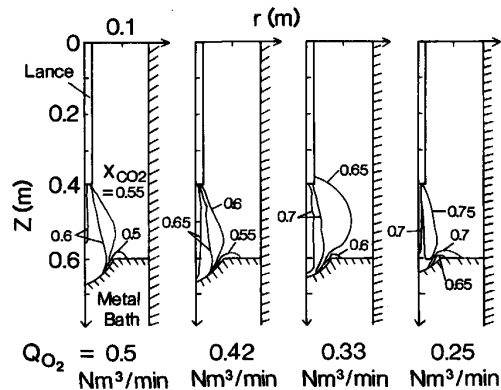


Fig. 12. Contours of mass fraction of CO<sub>2</sub> (oxygen flow rate: 0.25 ~ 0.5 Nm<sup>3</sup>/min, lance height: 0.2 m).

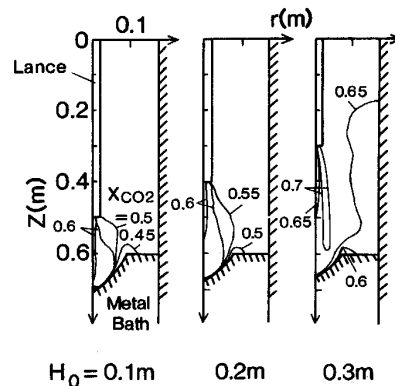


Fig. 13. Contours of mass fraction of CO<sub>2</sub> (lance height: 0.1~0.3 m, oxygen flow rate: 0.5 Nm<sup>3</sup>/min).

が最小となる理由はくぼみ面で  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}$  の反応が継続して生じ、CO がくぼみ部に沿った反転流によつて運ばれるためである。

Fig. 13 は  $H_0$  を変えた場合の等  $x_{\text{CO}_2}$  線図である。分布の傾向は Fig. 12 とほぼ同様であるが、 $H_0$  を大きくするにつれて同一地点での  $x_{\text{CO}_2}$  は大きくなる。

Fig. 14 には等  $x_{\text{CO}}$  線図を、 $Q_{\text{O}_2}$  を変えて示す。ランス先端とくぼみ部間では軸心に近づくにつれて  $x_{\text{CO}}$  が

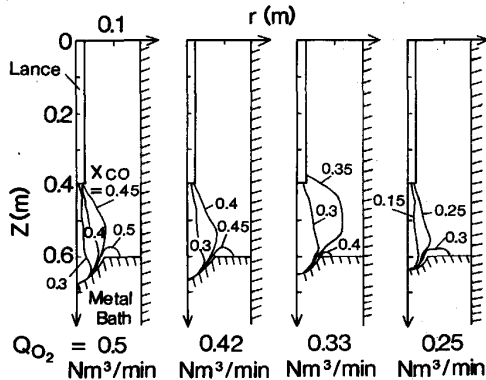


Fig. 14. Contours of mass fraction of CO (oxygen flow rate :  $0.25 \sim 0.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ , lance height :  $0.2 \text{ m}$ ).

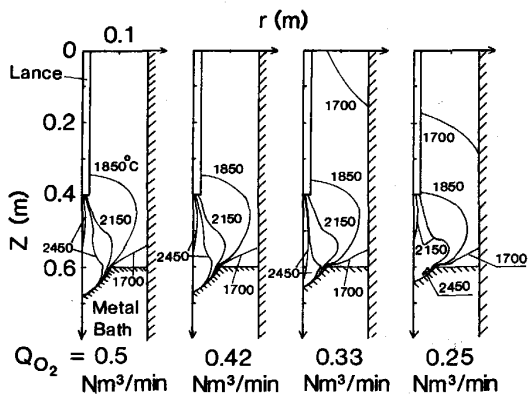


Fig. 15. Contours of gas temperature (oxygen flow rate :  $0.25 \sim 0.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ , lance height :  $0.2 \text{ m}$ ).

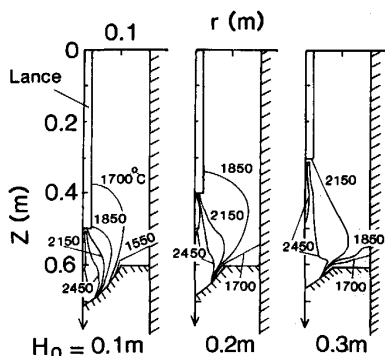


Fig. 16. Contours of gas temperature (lance height :  $0.2 \sim 0.5 \text{ m}$ , oxygen flow rate :  $0.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ ).

低下する。等  $x_{\text{CO}_2}$  線図と同様に、ランス先端より上方および炉壁近傍では  $x_{\text{CO}}$  の変化が少ない。なお、ランス高さを変えた場合も分布の傾向は同じである。

#### 4.2.3 温度分布

Fig. 15, 16 はそれぞれ  $Q_{\text{O}_2}$ ,  $H_0$  に対しての等温線図である。両図から、ランス先端とくぼみ部間の循環流(A)領域で最高温度帯が存在することがわかる。しかも、それは軸心方向にあり、燃焼ガスの火炎面に類似である。ランス先端より上方では温度勾配が小さいことも知られる。くぼみ面を上がるにしたがって温度が低くなるのは溶鉄への熱移動が継続して生じているためである。

Fig. 16 からわかるように、 $Q_{\text{O}_2}$  を一定として  $H_0$  を大きくすればガス出側 ( $z = 0 \text{ m}$ ) での温度は高くなる。一方、Fig. 15 のように、 $H_0$  を一定として  $Q_{\text{O}_2}$  を小さくするとわずかながら  $z = 0 \text{ m}$  でのガス温度は低くなる。しかし、前節で示した Fig. 8 から、 $Q_{\text{O}_2}$  を変えた場合の計算着熱効率を実測値と一致しないことがわかつていたので、Fig. 15 の温度の絶対値は実際と若干異なる可能性がある。

#### 4.2.4 まとめ

以上の結果をまとめると、ランス先端からくぼみ部間のガス濃度、温度勾配が他の領域に比べて大きいこと、循環流(A)領域では温度および  $\text{CO}_2$  濃度が最大となることがわかった。転炉内空間のガス流れにおいて、循環流(A)の熱、物質移動に果たす役割は非常に大きいといえる。

## 5. 結 言

300 kg 高周波炉で上吹きランスから  $\text{O}_2$  吹錬を行った場合のガス流れと熱、物質移動を理論的に解析し、実測値と比較した。

1) 炉内状況がシミュレート可能な計算モデルを構築した。

2) 本モデルでフローパターン、ガス濃度および温度分布を計算し、ランス先端とくぼみ部間、および炉壁近傍の溶鉄表面直上部に二つの循環流が存在すること、ランス先端とくぼみ部間の循環流領域に  $\text{CO}_2$  濃度と温度のピーク値があること、ランス先端からくぼみ部間での濃度、温度勾配は他の領域に比べて大きいことを明らかにした。

3) 300 kg 高周波炉実験により計算モデルの検証を行い、二次燃焼率およびランス高さの着熱効率への影響に関しては両者がよく一致することを確認した。

記号

$a$ : くぼみの形状係数 ( $m^{-1}$ ),  $d$ : ランスの内径 ( $m$ ),  $C_p$ : 混合ガスの比熱 ( $= 0.35 \text{ kcal/kg}\cdot\text{deg}$ ),  $D$ : 炉内径 ( $m$ ),  $dl$ : ガスの拡散係数 ( $m^2/s$ ),  $e_c$ : 溶鉄の輻射率,  $e_g$ : ガスの輻射率,  $F_{AE}$ : 総括吸収率 (—),  $g$ : 重力加速度 ( $m/s^2$ ),  $h$ : ガスのエンタルピー ( $\text{kcal/kg}$ ),  $h_c$ ,  $h_r$ : それぞれ対流, 輻射の伝熱係数 ( $\text{kcal/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$ ),  $h_t$ : 複合伝熱係数 ( $\text{kcal/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$ ),  $H$ : 炉口から火点までの距離 ( $m$ ),  $H_c$ :  $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$  の反応熱 ( $\text{kcal/kgO}_2$ ),  $H_0$ : ランス高さ ( $m$ ),  $J_{h,i}$ :  $i$  方向の熱流束 ( $\text{kcal/m}^2\cdot\text{s}$ ),  $J_{j,i}$ ,  $J'_{j,i}$ :  $i$  方向の質量流束 ( $\text{kgj/m}^2\cdot\text{s}$ ),  $k_i$ : 物質移動係数 ( $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ ),  $L$ : くぼみ深さ ( $m$ ),  $L_h$ :  $H_0 = 0$  でのくぼみ深さ ( $m$ ),  $L_0$ : 浴深さ ( $m$ ),  $\dot{m}$ : ランス出口での質量速度 ( $\text{kg/s}$ ),  $n$ : くぼみ面に対する法線方向 ( $m$ ),  $n_j$ : 界面における  $j$  成分の質量流束 ( $j = \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CO}$ ) ( $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ ),  $Nu$ : ヌッセルト数 (—),  $P$ : 圧力 ( $\text{atm}$ ),  $P_j$ :  $j (= \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CO})$  成分の分圧 ( $\text{atm}$ ),  $Pr$ : ガス流れのプラントル数 (—),  $Q_{\text{O}_2}$ :  $\text{O}_2$  流量 ( $\text{Nm}^3/\text{min}$ ),  $r$ : 半径 ( $m$ ),  $Re$ : レイノルズ数 (—),  $R_j$ :  $j (= \text{O}_2, \text{CO})$  成分の反応速度 ( $\text{kgj/m}^3\cdot\text{s}$ ),  $Sc$ : ガス流れのシュミット数 (—),  $Sh$ : シャーウッド数 (—),  $t$ : 時間 ( $\text{min}$ ),  $t_s$ : 着火時間 ( $\text{min}$ ),  $T$ : ガス温度 ( $\text{K}$ ),  $T_M$ : くぼみ界面での温度 ( $= 1700 \text{ K}$ ),  $T_r$ : ( $= 273 \text{ K}$ ),  $T_R$ : 炉壁表面の温度 ( $= 1700 \text{ K}$ ),  $V_p$ : ジェットのポテンシャルコア長さ ( $m$ ),  $V_i$ :  $i$  方向の速度 ( $\text{m/s}$ ),  $V_{z,i}$ :  $\text{O}_2$  ジェットの初速度 ( $\text{m/s}$ ),  $z$ : 高さ ( $m$ ),  $x_j$ :  $j (= \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CO})$  成分の質量分率 (—),  $X$ : ( $= x_{\text{O}_2} - (16/28)x_{\text{CO}}$ ),  $x_{j,f}$ : くぼみ界面での  $j$  成分の質量分率 (—),  $y$ : 火点中心を基準としたくぼみ部の高さ ( $m$ ),  $\alpha$ : 定数 (—),  $\alpha'$ : 定数 ( $\text{kcal/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{deg}^3$ ),  $\gamma$ : ( $z, r$ ) ( $= 0.3, 0.095$ ) における二次燃焼率 [ $= (\% \text{CO}_2) \times 100 / \{ (\% \text{CO}_2) + (\% \text{CO}) \}$ ],  $\gamma'$ : 系出口での二次燃焼率 [ $= (\% \text{CO}_2) \times 100 / \{ (\% \text{CO}_2) + (\% \text{CO}) \}$ ],  $\Gamma_h$ ,  $\Gamma_j$ : それぞれ熱,  $j$  成分の質量に対する変換係数 ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ),  $\Delta i$ :  $i (= \text{Si}, \text{Mn}, \text{P}, \text{Fe})$  の酸化量 ( $\text{kgi}$ ),  $\Delta H_i$ :  $i (= \text{Si}, \text{Mn}, \text{P}, \text{Fe})$  の酸化反応熱 ( $\text{kcal/kgi}$ ),  $\Delta H_{\text{steel}}$ : 溶鉄の顕熱増分 ( $\text{kcal}$ ),  $\Delta H_{\text{C} \rightarrow \text{CO}}$ :  $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$  の反応熱 ( $\text{kcal/kgC}$ ),  $\Delta H_{\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2}$ :  $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$  の反応熱 ( $\text{kcal/kgC}$ ),  $\tau_{ij}$ : 応力テンソル ( $\text{Pa}$ ),  $\eta_H$ : 着熱効率 (—),  $(\eta_H)_{\text{calc}}$ :  $\eta_H$  の計算値 (—),  $(\eta_H)_{\text{real}}$ :  $\gamma'$  の計算値をもとにした  $\eta_H$  の実測値 (—),  $\lambda$ : 熱伝導度 ( $\text{kcal/m}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$ ),  $\mu_e$ : 乱流

粘性係数 ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ),  $\text{O}_{2,i}$ :  $i (= \text{C}, \text{Si}, \text{Mn}, \text{P}, \text{Fe})$  の酸化に使われた  $\text{O}_2$  量 ( $\text{Nm}^3$ ),  $\rho$ : 混合ガス密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_i$ : 溶鉄密度 ( $= 7000 \text{ kg/m}^3$ ),  $\phi_{i,j}^{(K)}$ : ( $z, r$ ) ( $= i, j$ ) の格子点における  $K$  回の繰返し計算後の  $\phi$  ( $= \phi, w, h, X$ ),  $\psi$ : 流れ関数 ( $\text{kg/s}$ ),  $w$ : 渦度 ( $\text{s}^{-1}$ )

文 献

- 1) 例えば, A. BERTHET: Rev. Metall. (1983), Jan., p. 17
- 2) 例えば, 馬田 一, 田岡啓造, 山田純夫, 石塚晴彦, 民田彰輝: CAMP-ISIJ, 1 (1988), p. 135
- 3) 岡村祥三, 中島英雅, 丸川雄浄, 姉崎正治, 戸崎泰之, 森 明義, 加藤木健, 市原 清: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1787
- 4) 高柴信元, 新良正典, 小島信司, 武 英雄, 吉川文明: 鉄と鋼, 75 (1989), p. 89
- 5) Y. KATO, J. C. GROSJEAN, J. P. REBOUL and P. RIBOUD: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 28 (1988), p. 288
- 6) 石川英毅, 斎藤 力, 馬場賢一, 西村光彦, 阿部泰久: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 653
- 7) 平居正純, 辻野良二, 向井達夫, 原田俊哉, 大森正直: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 1117
- 8) 川上公成: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 708
- 9) 伊東修三, 鞭 巖: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 46
- 10) H. KRAINER, K. BROWSKI and J. MAATSCH: Krupp Technical Review, 23 (1965), p. 53
- 11) G. S. SAMUELSEN and E. S. SARKMAN: Combustion Science and Technology, 5 (1972), p. 31
- 12) R. W. SCHEFER and G. S. SAMUELSEN: Sixteen Symposium on Combustion, the Combustion Institute (1976), p. 119
- 13) R. E. PECK and G. S. SAMUELSEN: Sixteen Symposium on Combustion, the Combustion Institute (1976), p. 1675
- 14) 瀬川 清: 鉄冶金反応工学 (1976), p. 96 [日刊工業新聞社]
- 15) 大谷正康: 鉄冶金熱力学 (1976), p. 207 [日刊工業新聞社]
- 16) W. M. PUN and D. B. SPALDING: Imperial College, Mech. Eng. Dept. Rep. (1967), SF/TN/11
- 17) 伊東修三, 鞭 巖: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 1164
- 18) R. B. BIRD, W. E. STEWART and E. N. LIGHTFOOT: Transport Phenomena (1960), p. 658 [John Wiley & Sons INC.]
- 19) 化学機械の理論と計算 (第2版) (亀井三郎編) (1975), p. 109 [産業図書]
- 20) A. D. GOŠMAN, W. M. PUN, A. K. RUNCHAL, D. B. SPALDING and M. WOLFSTEIN: Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows (1969), p. 18 [Academic Press]
- 21) K. KATAOKA, H. SHUNDOH, H. MATSUO and K. KAWACHI: Chem. Eng. Commun., 34 (1985), p. 267