

論 文

UDC 669.046.5.001.57 : 541.127.012.6 : 541.127.012.4

噴流ガス-溶鉄間のガス側物質移動に関する数値解析*

谷 口 尚 司**・菊 池 淳**
 只 木 楨 力**・前 田 四 郎**

Numerical Analysis on the Gas-Phase Mass Transfer between an Impinging Jet of Gas and a Liquid Iron

Shoij TANIGUCHI, Atsushi KIKUCHI
 Teiriki TADAKI, and Siro MAEDA

Synopsis:

Theoretical studies have been made on the flow of gas and the mass transfer in the system with the immobile gas-liquid interface, in order to discuss the mass transfer between an impinging jet of gas and a liquid iron.

The upwind difference scheme has been used for formulation of the finite differential equations of the velocity of gas and the concentration of diffusing gas. The solutions of these finite differential equations have been obtained by the relaxation method. And also, the local and average Sherwood numbers have been calculated from above solutions.

Flow pattern visualized by tracer has been considerably similar to calculated one. The calculated values of average Sherwood number under various Schmidt and Reynolds numbers have been consistent with experimental ones obtained in the previous paper. An example of the absorption rate of nitrogen into liquid iron has been shown for the case in which the rate of absorption is controlled by mass transfer in gas phase.

1. 緒 言

ガスをノズルより溶鉄表面に吹きつけて反応をおこなわせる方法はガス、溶鉄間反応の速度論的研究によく用いられている方法の1つである。しかし、その実験系の物質移動現象は複雑でいまだ解明されておらず、そのため化学反応速度の解析が困難となつていていると考えられる。

著者らは上述の実験系の物質移動について一連の研究をおこなつており、前報^{1) 2)}ではとくにガス側物質移動を常温下ならびに高温下のモデル実験で検討し、平均物質移動係数に関する実験式を得た。

しかし、これらモデル実験条件下のガス側物質移動機構は流体の流動機構が不明確のために全く解明されておらず、したがってガス、溶鉄間反応条件下のガス側物質移動機構もまた不明である。

そこで本報では噴流ガスが溶鉄表面に接触する場合のガス側物質移動機構に関する知見をうるために、気-液界面が静止している場合についてガスの流れおよびガス

側物質移動を理論的に考察した。またその結果を前報のモデル実験結果と比較し、さらに溶鉄への窒素吸収速度をガス側物質移動律速の条件で求めた。

2. 数 値 解 析 法

Fig. 1 に本報で用いた反応器 (るつぼ型反応器)を示した。この反応器は抵抗炉内に設置されている。

$z=z_2$ から円筒状ノズル (内径 r_0) に導入されたガスはノズル先端 ($z=z_1$) から溶鉄表面 ($z=0$) に噴射されたのち、るつぼ壁 (半径 r_2) とノズル外壁 (半径 r_1) 間の環状部を上昇し、 $z=z_2$ から系外に排出される。

この場合の反応器内のガスの流れおよびガスと溶鉄間のガス側物質移動を理論的に考察するにあたり、つぎの仮定をおく。

- 1) 溶鉄の表面は酸化物などでおおわれており、噴流ガスによつて気-液界面は流動しない。すなわち、気-液界面は固体とみなしうる。
- 2) 気-液界面は平坦である。
- 3) 系内は等温である。

* 昭和 50 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 2 月 20 日受付 (Received Feb. 20, 1979)

** 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Sendai 980)

- 4) ガスの粘度 μ , 密度 ρ および拡散係数 D は一定である。
- 5) 拡散物質の気-液界面における濃度 c^* は半径 r によらず一定である。
- 6) 系内に流入するガス中の拡散物質の濃度 c_0 は半径 r によらず一定である。
- 7) 系内に流入するガスおよび系内から流出するガスの流れはいずれもピストン流れである。
- 8) 系内におけるガスの流れは軸対称流れである。
- 9) 定常状態である。

2.1 基礎式および境界条件

Fig. 1 に示す円筒座標系を用いると、連続の式、運動方程式および拡散方程式はそれぞれ Eqs. (1)~(4) で示され、また境界条件は Eq. (5) で示される。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial ru}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \nu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) \right\} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \dots\dots\dots (2)$$

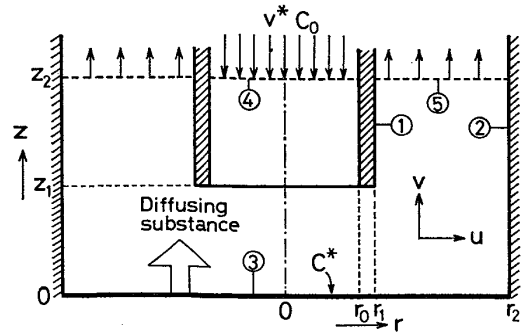
$$u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$u \frac{\partial c}{\partial r} + v \frac{\partial c}{\partial z} = D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} r=0, 0 < z < z_2 \text{ では } \partial c / \partial r = u = \partial v / \partial r = 0 \\ r=r_0, z_1 < z < z_2 \text{ では } \partial c / \partial r = u = v = 0 \\ r=r_1, z_1 < z < z_2 \text{ では } \partial c / \partial r = u = v = 0 \\ r=r_2, 0 < z < z_2 \text{ では } \partial c / \partial r = u = v = 0 \\ z=z_1, r_0 < r < r_1 \text{ では } \partial c / \partial z = u = v = 0 \\ z=z_2, 0 < r < r_0 \text{ では } c = c_0, u = 0, v = -v^* \\ z=z_2, r_1 < r < r_2 \text{ では } \partial^2 c / \partial z^2 = u = 0, \\ v = r_0^2 v^* / (r_2^2 - r_1^2) \\ z=0, 0 < r < r_2 \text{ では } c = c^*, u = v = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

以上の諸式を Eq. (6) に示す無次元量を用いて無次元化し、さらに Eq. (7) および (8) で定義した流れの関数 ψ および渦度 ζ を用いて整理すると、最終的に基礎式として Eqs. (9), (10), 境界条件として Eq. (11) を得る。

$$\left. \begin{aligned} R=r/r_2, Z=z/r_2, Y=(c-c_0)/(c^*-c_0), \\ U=r_2 u/\nu, V=r_2 v/\nu, V^*=r_2 v^*/\nu, \\ P=pr^2/\rho\nu^2, R_0=r_0/r_2, R_1=r_1/r_2, \\ Z_1=z_1/r_2, Z_2=z_2/r_2, Sc=\nu/D. \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$



① Nozzle, ② Wall of reactor, ③ Solid plate or gas-liquid interface contaminated by surfactants, ④ Gas inlet, ⑤ Gas outlet.

Fig. 1. Reactor configuration and coordinate system.

$$U = \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial Z}, V = -\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} \dots\dots\dots (7)$$

$$\zeta \left[= \frac{1}{R} \left(\frac{\partial U}{\partial Z} - \frac{\partial V}{\partial R} \right) \right] = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$U \frac{\partial \zeta}{\partial R} + V \frac{\partial \zeta}{\partial Z} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial R^2 \zeta}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial Z^2} \dots\dots (9)$$

$$U \frac{\partial Y}{\partial R} + V \frac{\partial Y}{\partial Z} = \frac{1}{Sc} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial Y}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 Y}{\partial Z^2} \right] \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} R=0, 0 < Z < Z_2 \text{ では } \partial Y / \partial R = \psi = 0, \\ \partial \{ (1/R) \partial \psi / \partial R \} / \partial R = 0 \\ R=R_0, Z_1 < Z < Z_2 \text{ では } \partial Y / \partial R = \partial \psi / \partial Z \\ = \partial \psi / \partial R = 0 \\ R=R_1, Z_1 < Z < Z_2 \text{ では } \partial Y / \partial R \\ = \partial \psi / \partial Z = \partial \psi / \partial R = 0 \\ R=1, 0 < Z < Z_2 \text{ では } \partial Y / \partial R = \partial \psi / \partial Z \\ = \partial \psi / \partial R = 0 \\ Z=Z_1, R_0 < R < R_1 \text{ では } \partial Y / \partial Z \\ = \partial \psi / \partial Z = \partial \psi / \partial R = 0 \\ Z=Z_2, 0 < R < R_0 \text{ では } Y = \partial \psi / \partial Z = 0, \\ \partial \psi / R \partial R = V^* \\ Z=Z_2, R_1 < R < 1 \text{ では } \partial^2 Y / \partial Z^2 \\ = \partial \psi / \partial Z = 0, \partial \psi / R \partial R \\ = R_0^2 V^* / (R_1^2 - 1) \\ Z=0, 0 < R < 1 \text{ では } Y = 1, \partial \psi / \partial Z \\ = \partial \psi / \partial R = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

なお、 ζ の境界条件は ψ の境界条件と Eq. (8) より与えられる。

2.2 計算方法

以上の基礎式を upwind 法³⁾⁴⁾ を用いて差分化し、半径方向 30 等分、軸方向 30 等分して緩和法により、流

線, 渦度および濃度の数値解を求めた*.

計算の収束条件としては Eqs. (12), (13)を用いた.

$$|\zeta^{n+1} - \zeta_{ca1}^n|_{\max} / |\zeta^{n+1}|_{\max} < 10^{-7} \dots\dots\dots (12)$$

$$|Y^{n+1} - Y^n|_{\max} < 10^{-7} \dots\dots\dots (13)$$

ここに, ζ_{ca1} , ζ および Y はそれぞれ Eqs. (8)~(10) の差分式より得られる値, n は反復回数である.

また Eq. (14) および (15) でそれぞれ定義した局所シャーウッド数 $(Sh)_R$, 平均シャーウッド数 Sh も算出した**.

$$\begin{aligned} (Sh)_R &\equiv (k_G)_r \frac{2r_0}{D} \\ &\equiv \left\{ -D \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} / (c^* - c_0) \right\} \frac{2r_0}{D} = -2R_0 \frac{\partial Y}{\partial Z} \Big|_{Z=0} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sh &\equiv k_G \frac{2r_0}{D} \\ &\equiv \frac{2r_0 / (c^* - c_0) D}{\pi r_2^2} \left[\int_{r_1}^{r_2} (vc)_{z=z_2} 2\pi r dr - \pi r_0^2 v^* c_0 \right] \\ &= 4ScR_0 \int_{R_1}^1 (VY)_{Z=Z_2} R dR \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

計算に使用したパラメータの数値は以下のとおりである:

$$R_0 = 1/3, R_1 = 0.4, Z_1 = 0.5, Z_2 = 1, V^* = 40 \sim 1000, Sc = 0.2 \sim 2.6$$

計算には東北大学大型計算機センタ: NEAC 2200, Model 700 を用いた. なお, 流線および濃度の計算に要した時間はそれぞれ約 20 min で, 反復回数は最大で約 2000 回である.

3. 計算結果および考察

3.1 フローパタン

Fig. 2 に $V^*=200$ の場合***の速度分布を, また Fig. 3 には $V^*=40 \sim 1000$ の場合の流線の計算結果を示した.

まず, $V^*=200$ の場合のガスの流れについてみる (Fig. 2, Fig. 3(B)). ガスはピストン流れで $Z=1$ から系内に流入するが, ガスがノズル内を流下するとともにその速度分布は放物線状に発達していくのがみとめられる. ノズル先端 ($Z=0.5$) をはなれたガスははじめ Z 軸にほぼ平行に流下し, その速度分布は放物線に近いが, 物質移動界面 ($Z=0$) に近づくにつれて R 方向に流れの

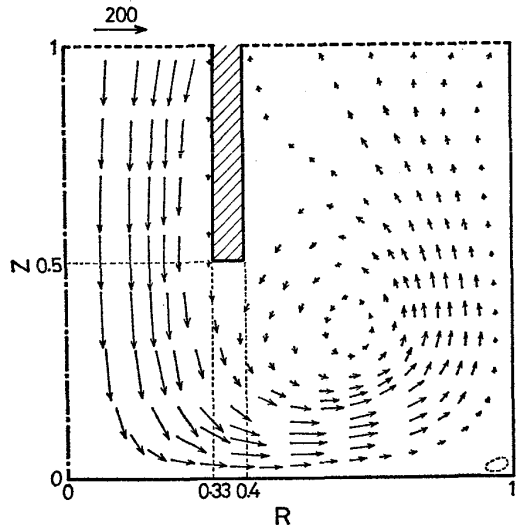


Fig. 2. Velocity profiles ($V^*=200$)

向きを変化しはじめその速度分布も複雑に変化する.

そののちガスは R 軸にほぼ平行に流れるが, るつぼ壁に近づくにつれて上向きに流れはじめ, その速度, 流路を変化させながら るつぼ上端に達し, そこからピストン流れで系外に排出される.

また, Fig. 3(B) より明らかなように, 図中のほぼ中央部 A と, るつぼ壁下端 ($R=1, Z=0$) の近傍 B に循環流が存在しているのがみとめられ, これがガスのフローパタンの1つの特徴となつている.

つぎに, Fig. 3(C), (D) より, $V^*=400$ および 1000 の場合のガスの流れについてみると, それらのガスのフローパタンは前述の $V^*=200$ の場合のそれとほぼ類似であるが, 二つの循環流の領域は V^* の増加とともに大きくなつている.

Fig. 3(A) より, $V^*=40$ の場合のフローパタンをみると, 中央部 A の領域は $V^*>200$ の場合のそれよりもかなり小さく, その外側の領域におけるガスの流れは循環流の影響をあまり受けておらず, そのガスの流線は $\phi=0.5 \sim 2$ においてほぼ等間隔にならんでいる.

以上, 速度および流線の数値解を示した.

つぎに $TiCl_4$ 蒸気をトレーサとしてガスのフローパタンを観察した結果の一例を Photo. 1 に示した. これは Fig. 2, 3(B) の計算条件と同一な条件 ($V^*=200, R_0=1/3, R_1=0.4, Z_1=0.5, r_2=2.0$ cm) で得られたものである. なお, この場合 $Z=Z_2 (R_1 < R < 1)$ には前報¹⁾と同様な目皿板を設けた. Photo. 1 の循環流の形と大きさは Fig. 3(B) のそれときわめてよく一致している. したがって本報の手法により得たガスの流れに関する数値解はほぼ妥当なものと考える.

* $R=0$ における ϕ を R の 4 次式で近似することにより求めた.
 ** Eq. (14) における $\partial Y / \partial Z|_{Z=0}$ は Y を Z の二次式で近似することにより求めた. また Eq. (15) の積分はシンプソンの公式により求めた.
 *** $V^*=200$ は $20^\circ C$ 窒素の場合, $v^*=15$ cm/s である.

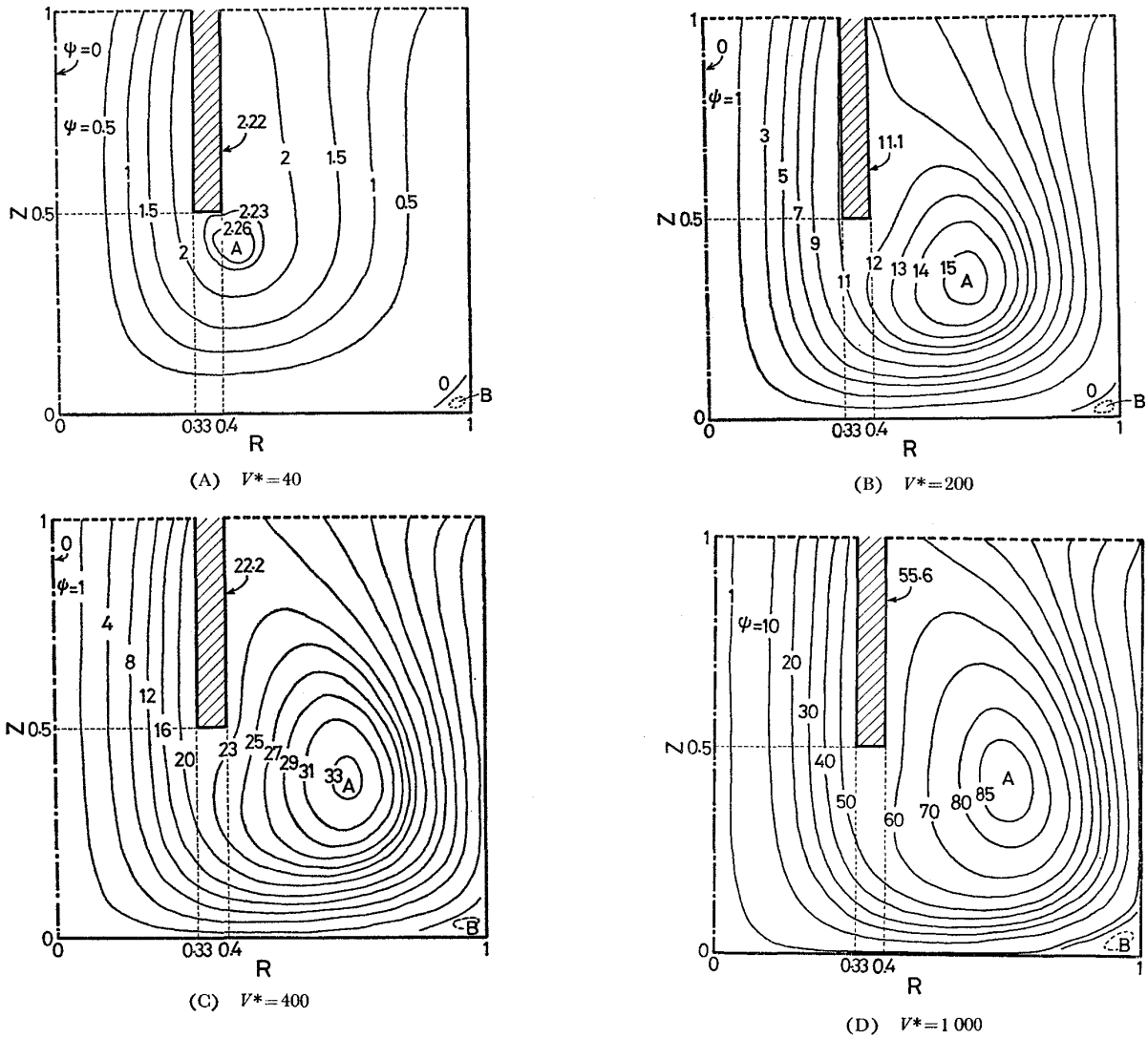


Fig. 3. Flow patterns.

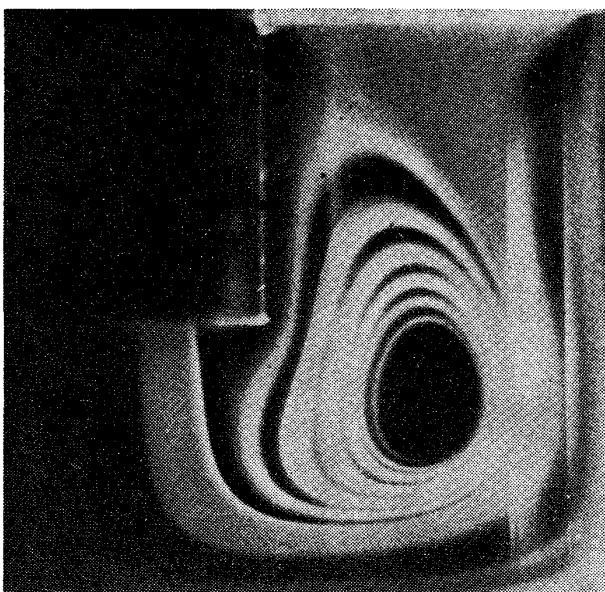


Photo. 1. Flow pattern visualized by tracer(TiCl_4)
 ($V^*=200$, $R_0=0.33$, $R_1=0.4$, $Z_1=0.5$,
 $r_2=2\text{cm}$)

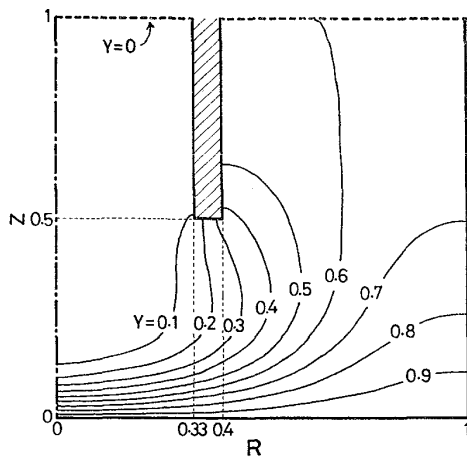
3.2 濃度分布

Sc および V^* を各種かえた場合の濃度 Y の計算値を Fig.4 に示した. 図より, 濃度分布は Sc および V^* でかなりことなっていることが分かる.

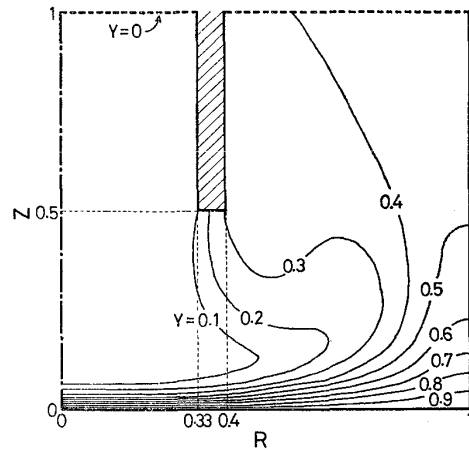
たとえば $Sc=1$ の場合の $Y=0.1$ の等濃度曲線に着目すると (Fig.4(A)~(D)), $V^*=40$ の場合のそれはやや放物線に近いが, V^* が大になるにつれてその曲線はしだいにゆがみ, 物質移動界面の方向におしつけられるとともにるつぼ壁の方向にひろがる型に変化してくる.

$V^*=200$ の場合の $Y=0.1$ の等濃度曲線も Sc によってことなるが (Fig.4(E), (F), (B), (G)), この Sc による等濃度曲線の変化は上述の V^* による変化に類似である.

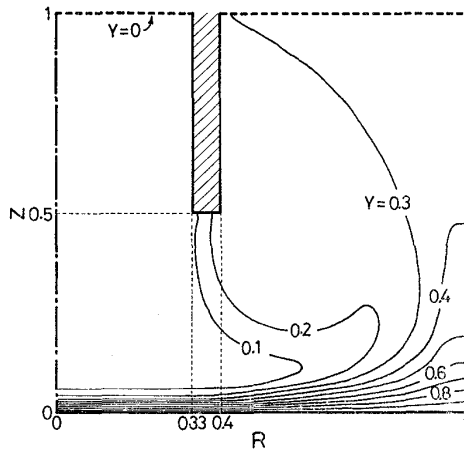
また, Fig.4 より, 物質移動界面近傍における Z 方向の濃度勾配は V^* または Sc が大になるにつれてきつくなっており, また反応器から流出するガスの濃度 Y は



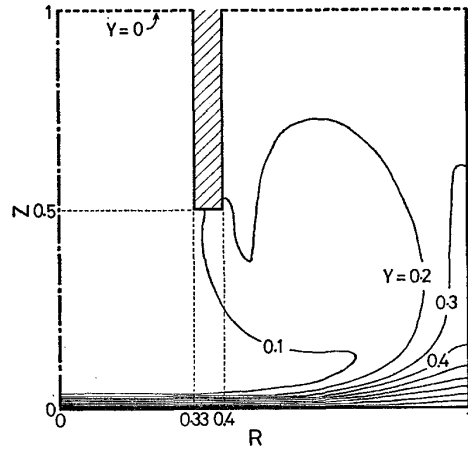
(A) $Sc=1, V^*=40$



(B) $Sc=1, V^*=200$



(C) $Sc=1, V^*=400$



(D) $Sc=1, V^*=1000$

V^* または Sc が大になるにつれて小さくなっていることがわかる。

3.3 局所物質移動速度

Eq. (14) で算出した局所シャーウッド数 $(Sh)_R$ を Fig. 5 に示した. 図より当然であるが, $(Sh)_R$ は V^* または Sc が大になるとともに大きくなっている. また図より, いずれの Sc および V^* の場合も $(Sh)_R$ は淀み点 ($R=0$) で極大となっており, またその値がほぼ一定となる領域がノズル直下にあることもみとめられる. この領域は V^* または Sc が大になるにつれて広がっており, またその領域の外側では $(Sh)_R$ はいずれの Sc, V^* の場合も R が大きくなるにつれて小さくなっている.

以上, 局所シャーウッド数したがって局所物質移動速度が半径 R によつてこととなり, またその値は Sc, V^* によつてもこととなることが示された. 局所物質移動速度に関するこのような知見は, ガス側物質移動が関与する場合のガス, 溶鉄間反応の反応速度を解析する上で有用なものであると考える.

3.4 平均物質移動速度

Eq. (15) で算出した平均シャーウッド数 Sh を $Sc=1$ および 2.6 の場合について Fig. 6 に示した. いずれの Sc の場合も Sh は V^* が大きくなるとともに大となっており, また同一の V^* では Sc の大きいほうが Sh が大となっているのがわかる.

本報の系のガス側物質移動については, 前報¹⁾においてナフタリン, 窒素系 ($Sc=2.6$) の昇華実験により検討しており, Sh はつぎのように与えられている.

(i) $z_1/2r_0 < (z_1/2r_0)_c$ では

$$Sh/2R_0 = 0.602Re^{0.66} \dots \dots \dots (16)$$

(ii) $z_1/2z_0 > (z_1/2r_0)_c$ では

$$Sh = 0.092Re \cdot (r_2/2r_0)^{-0.25} (z_1/2r_0)^{-0.5} \dots \dots \dots (17)$$

ここに,

$$(z_1/2r_0)_c = 0.0233Re^{0.68} (r_2/2r_0)^{1.5},$$

$$Re = 2R_0 \cdot V^*$$

本報の計算条件は $Z_1/2r_0 < (Z_1/2r_0)_c$ であり, したがってこの場合のナフタリン, 窒素系 ($Sc=2.6$) の Sh は

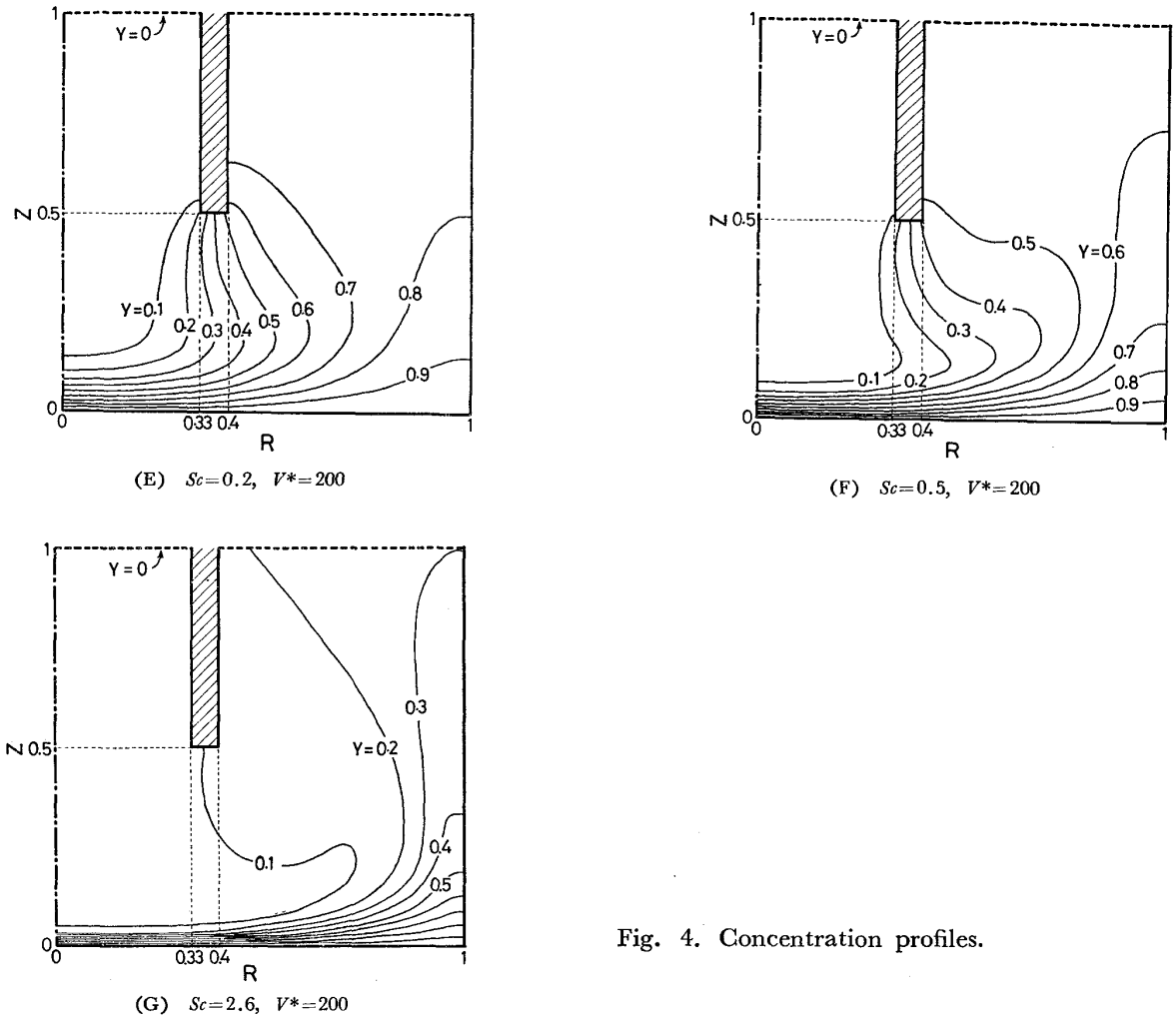


Fig. 4. Concentration profiles.

Eq. (16)であらわされると考えられる*1。いま、 $Sc=2.6$ の場合の Sh の計算値と Eq. (16)とを比較してみると、Fig. 6 のようになり両者の Sh は大略一致している。これより、前報のナフタリン、窒素系のガス側物質移動は本報の理論で記述されうるものと考えられる。

Fig. 6 より、 Sh の計算値は $Re^{0.66}$ にほぼ比例していると考えられるので、つぎに $Sh/Re^{0.66}$ と Sc との関係を $Re=133 (V^*=200)$ の場合について求めてみた。その結果を Fig. 7 に示したが、図より $Sh/Re^{0.66}$ は Sc が大きくなるにつれて大になつていく。

前報¹⁾では、噴流ガスが固体円板と接触する場合の他に、噴流ガスが静置液体と接触する場合および強制流動している液体と接触する場合のガス側物質移動も実験的に考察した。その結果 Eq. (18)で示される条件下では、

*1 Fig. 1 において、 $z=z_2$ から流入するガスの流れはピストン流れではなく放物線状の流れと考えられる。また前報のモデル実験ではガスの偏流を防ぐためガスの流出口 ($z=z_2, r_1 < r < r_2$) に目皿板をおいたが、この流出ガスの流れも完全なピストン流れではないと考えられる。しかし、本報では $z=z_2$ におけるガスの流れの相異によって、気-固界面 ($z=0$) 近傍の物質移動が大きく変化しないと考えた。なお第2章の仮定 1)~5), 8) 9) は前報のモデル実験条件下ではほぼみたまされていく。

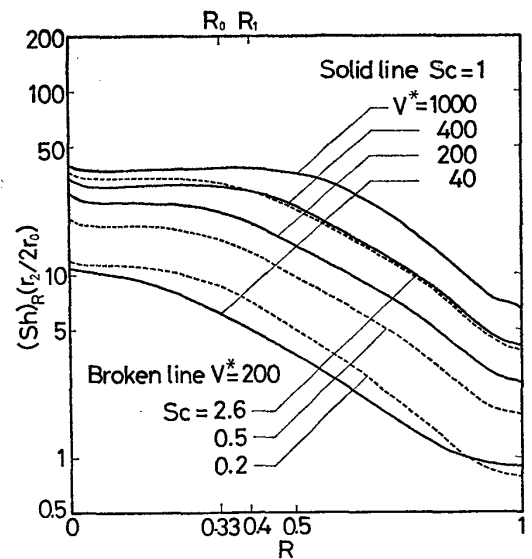


Fig. 5. Values of $(Sh)_R(r_2/2r_0)$ as a function of R at different Sc and V^* .

Sh は液の流動には無関係で $r_2/2r_0, Re$ および Sc のみで定まり Eq. (19)で与えられた。

$$z_1/2r_0 < (z_1/2r_0)_c \dots\dots\dots (18)$$

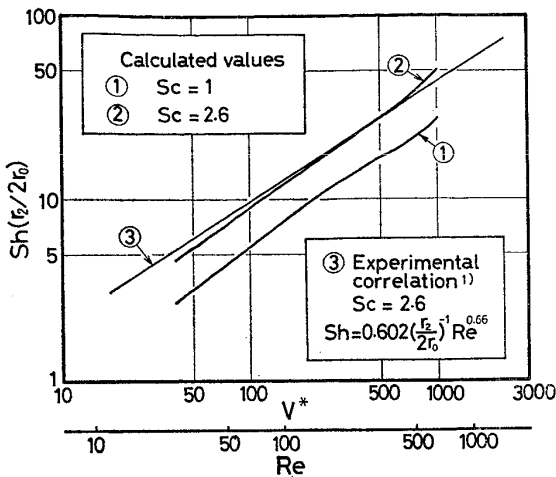


Fig. 6. Values of $Sh(r_2/2r_0)$ as a function of V^* at different Sc .

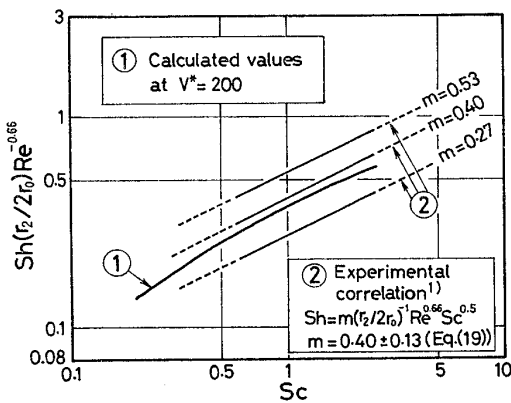


Fig. 7. Relation between $Sh(r_2/2r_0)Re^{-0.66}$ and Sc .

ここに

$$\begin{aligned} (z_0/2r_0)_c &= 0.00464Re^{0.66}(r_2/2r_0)^{1.5} \cdot A, \\ A &= \exp\{3.96(r_1/r_2)\} \cdot \{\exp(Sc)\}/Sc, \\ \left. \begin{aligned} Sh/2R_0 &= mRe^{0.66}Sc^{0.5} \\ m &= 0.40 \pm 0.13 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

Sh の計算値と Eq. (19) とを比較すると、Fig. 7 のようになり、両者は大略一致している。

液の流動の有無によつてガスの流動状態がことなり、それによつてガス側物質移動もことなると考えられるが、前報の実験条件下では液の流動の程度が小さかつたものと考えられる。しかしこの点については今後の理論的研究にまたねばならない。

3.5 溶鉄、ガス間のガス側物質移動速度

溶鉄、ガス間のガス側物質移動速度は、もし第2章の仮定 1)~9) がみたされまた気-液界面および流入ガス中における拡散物質の濃度が既知であれば本報の手法により求められる。

いま、一例として Ar-N₂ 混合ガスから N₂ が溶鉄に吸収される場合について考える。もし吸収過程がガス側

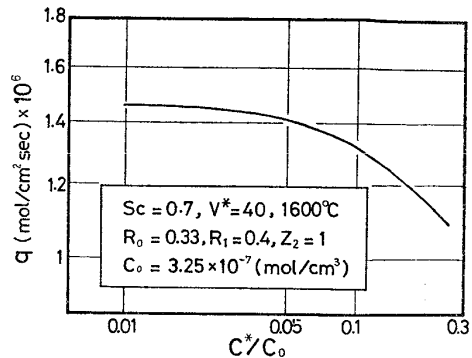


Fig. 8. Absorption rate of nitrogen into liquid iron when the mass transfer in gas phase is the rate-controlling step.

物質移動で律速されるならば、気-液界面における N₂ の濃度 c^* は液中の窒素濃度と Sieverts の式によつて算出される。したがつてこの場合送入ガス中の N₂ の濃度 c_0 を与えれば、吸収速度 q は Eq. (20) で求めることができる。

$$q = k_G(c_0 - c^*) = Sh(D/2r_0)(c_0 - c^*) \dots\dots\dots (20)$$

$Re = 26.7 (V^* = 40)$ の場合について q を求めた 1 例を Fig. 8 に示した。図より、吸収速度は c^*/c_0 の増加とともに減少しているが、これは気-液界面における N₂ の濃度 c^* がますにつれて気相内の濃度推進力が小さくなるためである。

4. 結 論

以上、気-液界面が静止している場合の噴流ガス、溶鉄間のガス側物質移動を理論的に考察し、つぎの結果を得た。

- (1) ガスのフローパタンが流入ガスの流速 V^* によつてことなることが示され、そのフローパタンは写真による観察結果と一致した。
- (2) 拡散物質の濃度分布が V^* および Sc でことなることが示された。
- (3) 局所シャーウッド数 $(Sh)_R$ は半径 R によつてことなることが示され、また種々の V^* , Sc における $(Sh)_R$ が与えられた。
- (4) 平均シャーウッド数 Sh の計算値は前報の実験値と大略一致した。
- (5) Ar-N₂ 混合ガスから溶鉄への N₂ 吸収速度の一例を求めた。

記 号

- c : ガス中の拡散物質の濃度 (mol/cm³)
- c_0 : 流入ガス中の拡散物質の濃度 (mol/cm³)
- c^* : 物質移動界面における拡散物質の濃度 (mol/cm³)
- D : 気相内拡散係数 (cm²/s)

k_G : 平均物質移動係数 (Eq. (15))	(cm/s)	Y : $\equiv (c - c_0) / (c^* - c_0)$	(-)
$(k_G)_r$: 局所物質移動係数 (Eq. (14))	(cm/s)	z : 物質移動界面から軸方向の距離	(cm)
m : Eq. (16)における定数	(-)	z_1 : ノズル先端と物質移動界面間の距離	(cm)
n : 計算の反復回数	(-)	z_2 : ガスの流入, 流出面と物質移動界面間の距離	(cm)
p : 圧力	(dyn/cm ²)	Z : $\equiv z/r_2$	(-)
P : $\equiv pr_2^2 / \rho \nu^2$	(-)	Z_1 : $\equiv z_1/r_2$	(-)
q : 吸収速度	(mol/cm ² ·s)	Z_2 : $\equiv z_2/r_2$	(-)
r : 反応器の中心軸から半径方向の距離	(cm)	ギリシャ文字	
r_0 : ノズル内壁の半径	(cm)	ζ : 渦度 (Eq. (8))	(-)
r_1 : ノズル外壁の半径	(cm)	μ : 粘度	(g/cm·s)
r_2 : 反応器の半径	(cm)	ν : 運動粘度	(cm ² /s)
R : $\equiv r/r_2$	(-)	ρ : 密度	(g/cm ³)
R_0 : $\equiv r_0/r_2$	(-)	ϕ : 流れの関数 (Eq. (7))	(-)
R_1 : $\equiv r_1/r_2$	(-)		
Re : レイノルズ数 ($\equiv 2r_0 v^* \rho / \mu$)	(-)		
Sc : シュミット数 ($\equiv \nu / D$)	(-)		
Sh : 平均シャーウッド数 ($\equiv 2r_0 k_G / D$)	(-)		
$(Sh)_R$: 局所シャーウッド数 ($\equiv 2r_0 (k_G)_r / D$)	(-)		
u : 半径方向の流速	(cm/s)		
U : $\equiv r_2 u / \nu$	(-)		
v : 軸方向の流速	(cm/s)		
v^* : 流入ガスの流速	(cm/s)		
V : $\equiv r_2 v / \nu$	(-)		
V^* : $\equiv r_2 v^* / \nu$	(-)		

文 献

- 1) 谷口尚司, 菊池 淳, 前田四郎: 鉄と鋼, 62(1976), p. 191
- 2) 谷口尚司, 菊池 淳, 前田四郎: 鉄と鋼, 63(1977), p. 1071
- 3) A. K. RUNCAL: Int. J. Num. Meth. Engng., 4(1972), p. 541
- 4) H. Z. BARAKAT and J. A. CLARK: Proc. 3rd Int. Heat Transf. Conf., 2(1966), p. 152