(37) 高炉溶融帯上端・層頂間の動的挙動の解析

名古屋大学 大学院 ○堀尾 正靱
名古屋大学 工学部 鞭 巌

1．緒言　高炉の計算機制御を有効に行なうための基礎資料として前回[1)]は，溶融帯・羽口間に着目した解析により，この部分の動的挙動が，大きな時定数をもつ溶融帯の位置変化過程によって支配されていることを報告した。本研究では，新たに，シャフト部の固気反応帯について数学的モデルを展開し，炉内ガスの温度や流量の変化に伴う炉頂ガスの温度および濃度，固体温度分布等の応答について解析する。また，一階双曲型偏微分方程式の数値計算上の問題を検討するため，Filipovich[2)]が提案した一変数系の場合の等高線法を多変数系に拡張し，特性曲線法との比較を行なう。

2．溶融帯上端・層頂間の数学的モデル　i)反応として，COによる間接還元反応と，ソリューション・ロス反応を考える。ii)還元反応はトポケミカルに進行すると考え，新たに二界面反応モデルを展開し，これを計算に組み入れる。基礎式および境界条件は(1)～(21)式で示される。

固体側：$(\partial t/\partial\theta)_c = h_p a(T-t) + (-\Delta H_1)R_1^* + (-\Delta H_2)R_2^*$ ····(1)，$(\partial f/\partial\theta)_c = R_1^*/1.5\rho_b X_{Fe}$ ····(2)，$(\partial\rho_b/\partial\theta)_c = -R_2^*$ ····(3)，粒子内反応界面進行の式：$(\partial r_j/\partial\theta)_c = -2R_{1j}^*/\pi n_j d_p^3 r_j^2 \rho_{Fe}$ ····(4)，また，$v=\rho_b u$，$\rho_b X_{Fe}=const.$，$\rho_b(1-X_c)=const.$ ····(5)，$(\partial/\partial\theta)_c \equiv (\partial/\partial\theta) + u(\partial/\partial z)$ ····(6)．

ガス側：$c_g V(\partial T/\partial z) = h_p a(T-t) + (c_g T - c_s t)R_2^*$ ····(7)，$(\partial V/\partial z) = -R_2^*$ ····(8)，$V(\partial x/\partial z) = R_1^* - (2-x)R_2^*$ ····(9)，$V(\partial y/\partial z) = -R_1^* + (1+y)R_2^*$ ····(10)．

境界条件：$z=0$ で，$t=t_0(\theta)$，$\rho_b=\rho_{b0}(\theta)$，$f=f_0$ ····(11)，$z=z_1$ で，$T=T_{z1}(\theta)$，$x=x_{z1}(\theta)$，$y=y_{z1}(\theta)$，$V=V_{z1}(\theta)$，$v=v_{z1}(\theta)$ ····(12)．ただし，$R_1^*=\pi d_p^2\phi^{-1}N(273P/22.4t)(x-\bar{x}_e)/\bar{\mathcal{R}}$ ····(13)，$R_{11}^* = R_1^*/N - R_{12}^*$ ····(14)，$R_{12}^* = \alpha R_1^*/N - \alpha\beta$ ····(15)，$\alpha \equiv \mathcal{R}_{r1}/(\mathcal{R}_{r1}+\mathcal{R}_{r2}+\mathcal{R}_{s2})$ ····(16)，$\beta \equiv (273P/22.4t)(x_{e2}-x_{e1})/\mathcal{R}_{r1}$ ····(17)，$\bar{x}_e \equiv \{\mathcal{R}_{r1}x_{e2} + (\mathcal{R}_{s2}+\mathcal{R}_{r2})x_{e1}\}/(\mathcal{R}_{s2}+\mathcal{R}_{r1}+\mathcal{R}_{r2})$ ····(18)，$x_{ej} = (x+y)/(1+K_{1j})$ ····(19)，$\bar{\mathcal{R}} \equiv \mathcal{R}_f + \mathcal{R}_{s1} + \mathcal{R}_{r1}(\mathcal{R}_{s2}+\mathcal{R}_{r2})/(\mathcal{R}_{s2}+\mathcal{R}_{r1}+\mathcal{R}_{r2})$ ····(20)，$n_1=1$，$n_2=0.5$ ···(21)

3．計算方法　定常解を初期条件として，次の二つの方法で非定常過程の計算を行なう。i)特性曲線法：この場合，一階双曲型偏微分方程式に特有の特性基礎曲線[3)] $dz/d\theta = u(\theta)$ に沿って固体側変数を積分する。ii)等高線法：いま，$t=t_i$ なる点を z_i とすると，z_i の時間的変化を(22)式で求め，温度以外の固体側変数 ψ の等温線 z_i に沿う変化を(23)式で計算する。$dz_i/d\theta = u - \{(\partial t/\partial\theta)_c/(\partial t/\partial z)\}_{z=z_i} \fallingdotseq u - (\partial t/\partial\theta)_{c,z=z_i}(z_i - z_{i-1})/(t_i - t_{i-1})$ ····(22)，$d\psi/d\theta = \{(dz_i/d\theta - u)(\partial\psi/\partial z) + (\partial\psi/\partial\theta)_c\}_{z=z_i}$ ····(23)．

この方法では，きざみ数が減少でき，計算時間が短縮されるとともに，温度勾配の変化に応じて，きざみ副を自動的に修正することができる。計算は現在稼動中の高炉のデータに基づいて実行した。

（記号）c_s, c_g：固体，ガス平均分子比熱[kcal/kgmol℃]，d_p：鉱石粒子径[m]，f：還元率，$h_p a$：熱伝達容量係数[kcal/m³hr℃]，K_{1j}：平衡定数，N：層単位体積中鉱石粒子個数[m⁻³]，P：全圧[atm]，r_j：粒子内反応界面位置[-]，R_1^*：還元反応速度[kgmol/m³hr]，R_2^*：ソリューション・ロス反応速度，$\mathcal{R}$：抵抗[hr/m]，$\bar{\mathcal{R}}$：総括反応抵抗，t, T：固体，ガス温度[°K]，u：固体線速度[m/hr]，v, V：固体，ガス流量[kgmol/m²hr]，x, y：CO, CO_2 モル分率，X_c, X_{Fe}：固体中C, Feのモル分率，z：炉頂からの距離[m]，z_1：溶融帯上端の位置，ρ_b：かさ密度[kgmol/m³]，θ：時間[hr]，ϕ：粒子形状係数[-]

（添字）e：平衡，f：ガス境膜拡散抵抗，j：j=1 のとき Fe_2O_3-FeO界面，2のとき Fe-FeO界面，r_1, r_2：界面1,2における反応抵抗，s_1, s_2：粒子表面～界面1，界面1～2間粒内拡散抵抗

（文献）1) 堀尾・鞭：鉄と鋼 55 No.3, S14，2) Filipovich：Automation and Remote Control (1967) No.7, P.1126，3) Courant and Hilbert：数理物理学の方法（邦訳）オ3巻，P.52.