

# (11) 酸化鉄ペレットの脈動還元反応速度 (単一球の場合の理論計算)

大阪大学 工学部 近江宗一 ○碓井建夫 谷口滋次

1. 緒言 鉄鉱石ペレットの還元反応に脈動流れを適用する試みは1960年頃から行なわれている。<sup>1)~4)</sup>

他方化学・機械工学の分野では近年脈動流れの研究が盛んであり、<sup>5) 6)</sup> 熱・物質移動の促進を旨とするものが多い。その中に単一球からの熱・物質移動におよぼす脈動流れ、あるいは振動の影響を扱った研究も見受けられる。<sup>7)~10)</sup>

ここでは酸化鉄ペレットの還元反応に脈動流れを適用した場合の効果を理論的に推定するために、単一球の場合について、3過程を考慮した総括反応速度式<sup>11) 12)</sup>に、脈動流れにおけるガス境膜内物質移動係数を適用して還元時間を求め、定常流の場合と比較した。

2. 理論 計算条件 管の直径 7.7 cm  
混合ガス  $p_{H_2} = 0.4, p_{H_2O} = 0.6$   
Reynolds数  $0.0931 \leq Re_p \leq 142$

まず下記の前提を設けることにする。

- i) 脈動流れは3過程のうち、ガス境膜内拡散にのみ効果がある。
- ii) 脈動流れの場合でも定常流の場合における諸定数を用い得る。
- iii) 考えている系は等温で、脈動流れによる熱移動の増大は考慮しなくてよい。
- iv) 気孔率が大きい場合にも一界面の未反応核モデルを用い得る。

なお脈動流中の単一球からの物質移動を表わす式はいくつか示されているが、脈動の周波数、振幅および平均流速をすべて考慮した式(3)<sup>10)</sup>をここでは用いる。すると還元時間はつぎのように表わされる。<sup>11) 12)</sup>

$$t_i / (1.5 \rho_p d_p) = \frac{F}{3k_{fi}} + \frac{3 - 3(1-F)^{2/3} - 2F}{12 \mathcal{D}_p / d_p} + \frac{1 - (1-F)^{1/3}}{k(1+1/K)} \quad (i = st, pl); \dots (1)$$

$$Sh_{st} = k_{fst} d_p / \mathcal{D} = 2.0 + 0.55 Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \quad \dots (2)$$

$$Sh_{pl} = \frac{k_{fpl} d_p}{\mathcal{D}} = \left( 2.0 + 0.55 Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \right)^3 + \left( 0.35 Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \right)^3 \left( \frac{2\pi a f}{u} \right)^2 \left( \frac{3u}{2\pi d_p f} \right)^{1/2} \dots (3)$$

$$12 \mathcal{D}_p / d_p = 12 \epsilon_F \alpha \mathcal{D} / d_p = 12 (0.534 + 0.466 \epsilon_p) (4.4 \times 10^{-4} (T - 773) + 0.18) \mathcal{D} / d_p; \dots (4)$$

$$k(1+1/K) = \exp(16.2 - 12930/T) + \exp(15.12 - 11190/T) \quad \dots (5)$$

以上の式によって、 $T, V, d_p, \epsilon_p, F$  を変数とする定常還元時間  $t_{st}$ 、さらに  $f, a$  を変数とする脈動還元時間  $t_{pl}$  を求める。

いま脈動還元の効果率  $\psi$  を次式  $\psi = (t_{st} - t_{pl}) / t_{st} \dots (6)$

で表わせば、 $T \uparrow, V \downarrow, \epsilon_p \uparrow, F \downarrow, f \uparrow, a \uparrow$  ほど  $\psi \uparrow$  となるのがわかる。ところが  $d_p$  に関しては 図1-a に示すように  $\lim_{d_p \rightarrow 0} (\partial \psi / \partial d_p) = (\partial \psi / \partial d_p)_{d_p = d_p^*} = \lim_{d_p \rightarrow \infty} (\partial \psi / \partial d_p) = 0$

しかも  $\lim_{d_p \rightarrow 0} \psi = \lim_{d_p \rightarrow \infty} \psi = 0$  であることから極大値を持つことがわかる。

3. 計算結果 用いた定数<sup>12)</sup>および変数の値を表1に示す。

表1 定数<sup>12)</sup>および変数の値

T (°K)	1073.1	1173.1	1273.1	1373.1	1473.1
$\mathcal{D}$ (cm <sup>2</sup> /min)	460	545	630	720	820
$Sc$ (—)	0.2475	0.2425	0.2375	0.2325	0.2275
V (Nl/min)	0.25	1	4	16	64
$d_p$ (cm)	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0
$\epsilon_p$ (—)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
f (c/min)	0.2	1	5	25	125
2a (cm)	1	2	4	8	16
F (—)	0.005	0.01	0.025	0.05	0.10
	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50
	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85
	0.90	0.95	0.975	0.99	1.00

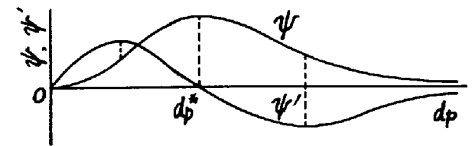


図1-a  $\psi(d_p)$  と  $\psi' = \partial \psi / \partial d_p$

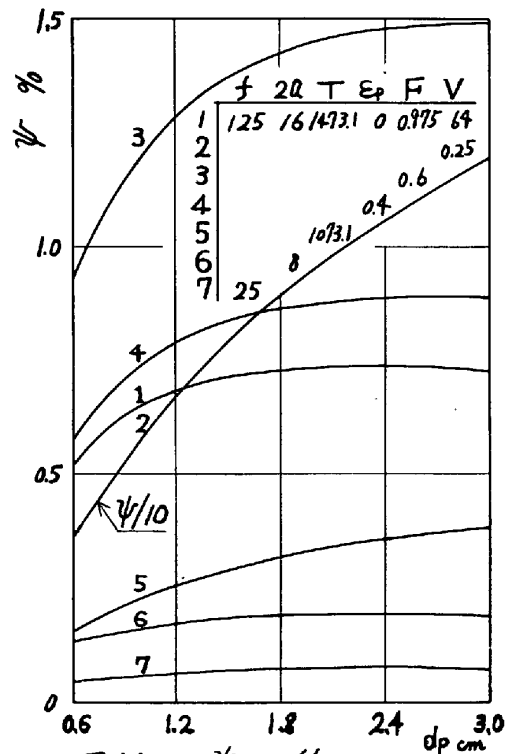


図1-b  $\psi$  の値

図2に $\psi$ および $\psi$ の $F$ に対する変化を示す。脈動流れを適用することは $V \uparrow$ と類似している。<sup>4)</sup>  $\psi$ の $f$ と $a$ による変化を図3に示す。 $f$ と $a$ の増加と共に急激に $\psi$ が増大しているが、 $k_f \rightarrow \infty$ の場合に比べて、脈動による $k_f$ の増加は少ない。しかし $f$ をさらに大きくすれば、 $k_f$ を十分大きくすることができる。

図4に $\psi$ の $T, V, \epsilon_p$ による変化を示す。 $T \uparrow, \epsilon_p \uparrow, V \downarrow$ ほど $\psi \uparrow$ である。<sup>4)</sup>  $V \uparrow$ ではガス境界膜内拡散抵抗が無視しうようになり、脈動流れの効果はほとんど無くなる。<sup>3)</sup>  $\psi$ が $d_p$ に関して極大値を持つことは図1-bからわかる。ただ単一球の場合の議論であるので、工業的な意味でも最適値があるかどうかはわからない。

4. 結言

- i) 行なわれた実験の範囲を越えて式(3)を計算に用いたので、式(3)を実験的に検討する余地がある。
- ii) 元来式(3)は球の振動の振幅を $a$ としていたので、 $a$ に脈動流れの振幅を用いる場合は、脈動速度分布<sup>11)12)</sup>を考慮する必要がある。
- iii) 粒内拡散に対する脈動の影響を実験結果より論じたもの<sup>11)12)</sup>も見られるので、今後検討する余地がある。
- iv)  $\psi$ は $d_p$ に関して極大値を持つ。
- v) 計算結果はiii)を除けば定性的に実験結果<sup>11-4)</sup>と一致した。

記号

- $a$  : 脈動の振幅 (cm)
- $C, C^*$  : 還元ガスのバルク、平衡濃度 (mol H<sub>2</sub>/mol)
- $\phi, \phi_p$  : ガス、粒内拡散係数 (cm<sup>2</sup>/min)
- $d_p, d_p^*$  : ペレット直径、 $\psi$ が極大値をとるペレット直径 (cm)
- $F$  : 還元率 (—)
- $f$  : 脈動の周波数 (c/min)
- $K$  :  $\frac{1}{2}Fe_2O_3 + H_2 = \frac{1}{2}Fe + H_2O$ の平衡定数 (—)
- $h$  : 反応速度定数 (cm/min)
- $k_{fi}$  : ガス境界膜内物質移動係数 (cm/min)
- $Rep = u d_p / \nu$  : レイノルズ数 (—)
- $S_c = \nu / D$  : シュミット数 (—)
- $Sh_i = k_{fi} d_p / D$  : シャラウド数 (—)
- $T$  : 還元温度 (°K)
- $t_i$  : 還元時間 (min)
- $u$  : (時間平均) ガス流速 (cm/min)
- $V$  : (時間平均) ガス流量 (NL/min)
- $\epsilon_f, \epsilon_p$  : 還元鉄層、未反応核の気孔率 (—)
- $\nu$  : ガスの動粘性係数 (cm<sup>2</sup>/min)
- $\xi$  : ラビリンズ係数 (—)
- $\rho_p$  : ペレットの見かけモル密度 (mol Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/cm<sup>3</sup>)
- $\psi$  : 脈動還元の効果率 (—)
- 添字  $i = st, pl$  : 定常、脈動流れにおける値

文献

- 1) H. Schenck, J. Cloth: *Stahl u. Eisen*, 80 (1960) 22, 1453.
- 2) 児玉, 重見, 東: *鉄と鋼*, 48 (1962) 4, 379.
- 3) 山田, 津田: *鉄と鋼*, 52 (1966) 9, 1370.
- 4) A.B. Aboucinu, A.A. Myzobuykui, B.A. Irazovani: *Ugl. B. Y. Z. Upr. Metal.*, (1970) 9, 13.
- 5) 近江, 磯井: 日本機械学会関西支部 第46期定時総会講演会講演論文集, (1971) 714-7, 27.
- 6) 近江, 磯井: 日本機械学会関西支部 第226回講演会 講演論文集, (1971) 714-9, 47.
- 7) 北浦, 青木: *化学工学*, 24 (1960) 3, 134.
- 8) P. Noorduij, J.W. Rotta: *Chem. Eng. Sci.*, 22 (1967), 1475.
- 9) Y. Inori, M. Anabayashi, K. Higikata, Y. Yoshida: *Heat Mass Transfer*, 12 (1969), 571.
- 10) 北浦, 田中, 上田, 小島: *化学工学*, 33 (1969) 2, 175.
- 11) 松下, 盛, 不破, 館森, 瀬川: *冶金物理化学*, 丸善, (1970).
- 12) 高橋, 八木, 大森: *鉄と鋼*, 57 (1971) 10, 1597.

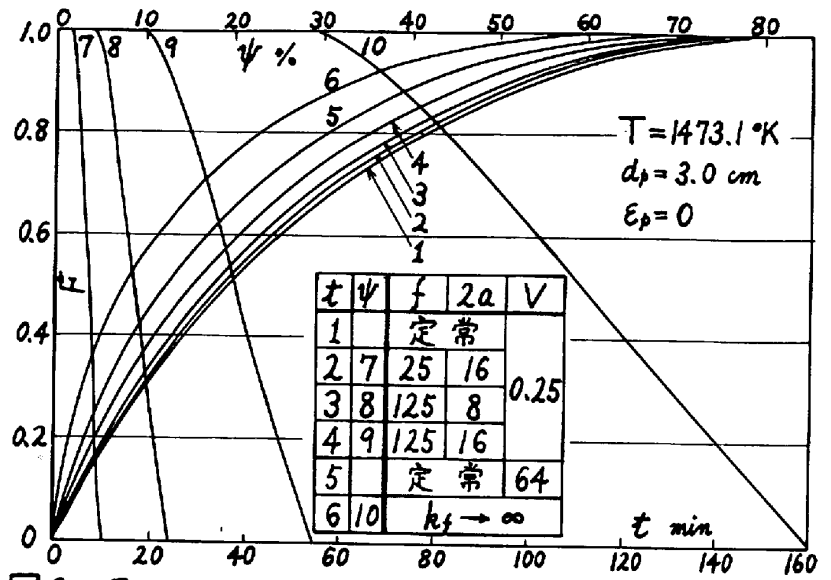


図2 F-t曲線 および F- $\psi$ 曲線

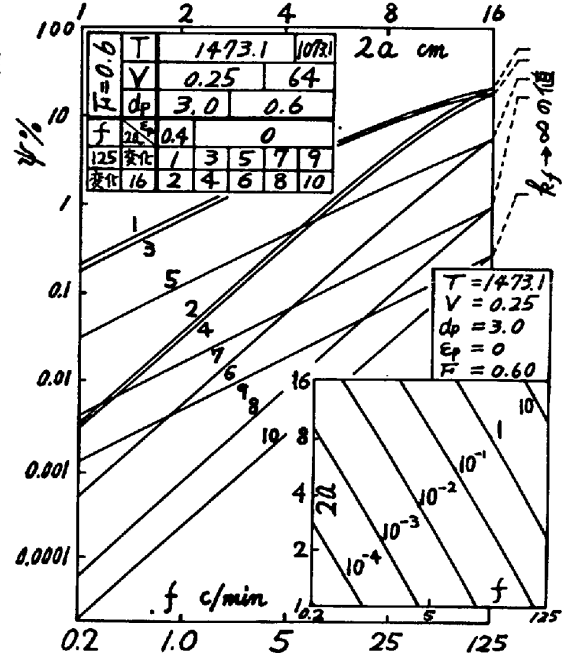


図3  $\psi$ の値

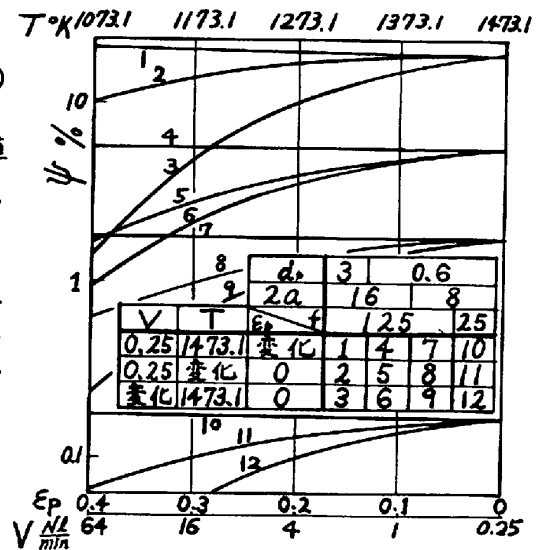


図4  $\psi$ の値