

京都大学工学部 正員 尾崎博明
同 同 寺島 泰
建設省土木研究所 同 清水俊昭

1. はじめに 下・廃水を高効率かつ経済的に処理できる可能性の高い新しい方法として、我々は高勾配磁気分離法(HGMS)に注目し、検討を始めている。HGMSは強大な磁気力を磁性粒子に作用させてフィルタにより捕獲する磁気ろ過法であるが、本研究では、粒子捕獲に及ぼす影響因子を明らかにし、またフィルタ効率予測の基礎を得る目的で、孤立磁性線上への磁性粒子の捕獲について理論的、実験的に検討を行ったので報告する。

2. 孤立磁性線上への磁性粒子捕獲 2-1. 理論的検討 孤立磁性線に接近する磁性粒子に作用する力として磁気力 F_M のほか、競合力として、流体抵抗力 F_D 、重力 F_g 、慣性力 F_I の3つの力を取上げると、運動方程式は $F_I + F_M + F_D + F_g = 0$ ……(1) と書ける。磁場 H_0 、流れ場 V_0 、重力加速度 g が図-1に示すような方向に作用する場合、(1)式を具体的に書き表わすと、極座標系 (r, θ) では(2)式のようになり、これを解くことにより粒子軌跡が求まる。

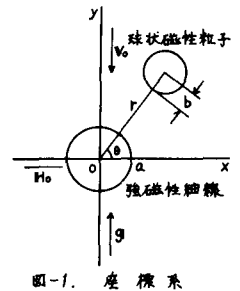


図-1. 座 標 系

$$\left. \begin{aligned} K \left[-\frac{d^2 r_a}{dt^2} + r_a \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] - \frac{V_m}{V_0} \left(\frac{r}{r_a^3} + \frac{\cos 2\theta}{r_a^3} \right) + \left(\frac{V_{tr}}{V_0} + \frac{dr_a}{dt} \right) + N_g \sin \theta &= 0 \\ K \left[-r_a \frac{d^2 \theta}{dt^2} - 2 \left(\frac{dr_a}{dt} \right) \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \right] - \frac{V_m}{V_0} \frac{\sin 2\theta}{r_a^3} + \left(\frac{V_{jo}}{V_0} - r_a \frac{d\theta}{dt} \right) + N_g \cos \theta &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

ここに、 $K = 2\rho_p V_0 b^2 / 9\eta a$ (慣性パラメータ)、 $V_m/V_0 = 2\chi_s H_0 M b^2 / 9\eta a V_0$ (V_m : 磁気速度)、 $r_a = r/a$ (3)

$\ell = M/2\mu_0 H_0$ (反磁場パラメータ)、 $N_g = 2b^2(\rho_p - \rho_f)g/9\eta V_0$ (重力パラメータ)、 $\tau = V_0 t/a$

であり、式中の記号は、 a : 細線半径、 b : 粒子半径、 ρ_p : 粒子密度、 ρ_f : 流体密度、 η : 流体粘度、 V_0 : 流体の表面速度、 V_{tr} , V_{jo} : 流体速度の r , θ 成分、 H_0 : 印加磁場、 M : 細線の磁化、 χ_s : 粒子の比磁化率、 μ_0 : 真空中の透磁率、 g : 重力加速度、 t : 時間、である。なお(2)式の誘導に際して $b \ll a$ かつ $Re < 1$ と仮定している、 F_M を粒子中心の値で近似し、 F_D にストークス則を適用している。流れ場は今回は簡単のためポテンシャル流により近似し、(2)式の数値計算は4次のRunge-Kutta法により行った。

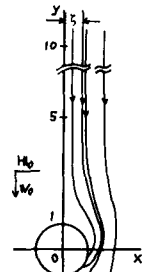
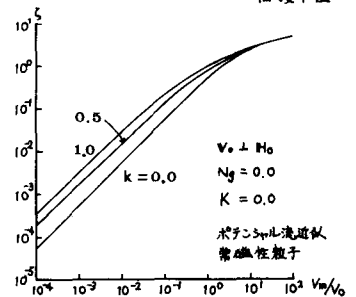


図-2. 粒子軌跡と捕獲半径

パラメータ ℓ 、 N_g 、 K の比捕獲半径に及ぼす影響 主要なパラメータのうち、反磁場パラメータ ℓ 、重力パラメータ N_g 、慣性パラメータ K の比捕獲半径 (ζ) に及ぼす影響について検討を行った。ここで比捕獲半径 ζ とは、図-2に示すように、捕集体上に到達しうる粒子軌跡のうち、捕集体のはるか上流で最大の x 座標をとる軌跡について、その x 座標を a で規格化した無次元数 (ζ_{max}/a) のことをいい、粒子回収率と直接関わりをもつ。

ℓ の比捕獲半径に及ぼす影響(図-3)は、 V_m/V_0 が小さい領域ではかなり大きく、 $\ell = 0.0$ と 1.0 を比較すると数倍のひらきがある。一方、 N_g について(図-4)は $N_g = 0.1$ でわずかに比捕獲半径が小さくなるもののほとんど影響がみられない。今回実験で用いたヘマタイト粒子を捕集する場合について検討すると、 $N_g = 0.1$ は $V_0 = 50 \text{ m/hr}$ のとき $b = 40 \mu\text{m}$ 、 $V_0 = 100 \text{ m/hr}$ のとき $b = 60 \mu\text{m}$ に相当し、ミクロンあるいはサブミクロン粒子を対象とするHGMS処理では、重力の影響を考慮する必要はないと考えられる。 K の影響(図-5)は極めて大きく、今回の計算ではおおよそではあるが、 V_m/V_0 値が K の約10倍のあたりから比捕獲半径が徐々に小さくなりはじめ、 $V_m/V_0 \approx K$ に達すると粒子の捕獲はほとんど期待できないという結果が得られた。ただし、水中

図-3. ℓ の ζ に及ぼす影響

の懸濁粒子を取扱うときには必ずしも大きな役割を果たすとは限らない。

2-2. 比捕獲半径の実験的推定 比捕獲半径 r の定義から、 $\gamma=+\infty$ において $-\alpha \leq x \leq \alpha$ の位置から出発した粒子は磁性線に捕獲され、蓄積していく。(ただし付着率=1とする。) Δt 秒間に磁性線単位長さ当りに捕獲される粒子質量が、 Δt 秒間における蓄積粒子の断面積変化と蓄積している状態での粒子の実効密度($\beta \rho_p$)との積に等しいとすると、 r を表わす式として、 $r = \{\pi \alpha \beta \rho_p / 2 V_0 C_{in}\} \frac{d}{dt} (S/S_0) \dots (4)$ が導かれる¹⁾。ここに、 S : 粒子の蓄積断面積、 S_0 : 磁性線断面積、 C_{in} : 粒子流入濃度、 β : 蓄積粒子の見かけの占有体積に対する真の占有体積の比、である。(4)式より粒子蓄積速度 dS/dt と β を実験的に求めることにより r を定めることができる。

(1) 実験装置と方法 a) 粒子蓄積速度の観察 実験装置を図-6に示す。磁場は紙面に対して垂直方向に印加している。実験粒子には取扱いの簡便さから市販のヘマタイト($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)を摩砕後沈降法により整粒したものをを用い、これを予め分散剤 $[(\text{NaPO}_3)_6]$ を溶解させた蒸留水中に超音波分散させたものを原水とし、上向流でセルに供給した。(粒子の諸元を表-1にまとめる。) セルは透明アクリル製の角柱状(17mm×20mm)であり、セル内には孤立磁性線(SUS430, $\alpha=400\mu\text{m}$)を磁場及び流れと直交するようにセル内に片持で固定してある。蓄積断面積は写真撮影後、アラニメータにより測定した。なお粒子の平均粒径は光透過式粒度分布測定器、磁性特性は垂直型ねじれ磁気天びん(MTB)によりそれぞれ測定し、また粒子密度は比重びん法によった。

b) β 値の決定 蓄積粒子の見かけの体積は写真撮影により容易に求まるが、正味の占有体積を求めるには蓄積粒子をセル外に取り出し重量を測定する必要がある。ここではセルを磁場下に置いた状況においてセル内の水をドライアイスにより凍結させ、磁性線に付着した粒子を固定する方法をとった。なお、とりだした粒子は溶解後原子吸光光度法により測定し、その結果、ヘマタイトの β 値として0.24を得た。

(2) 結果と考察 実験条件を表-2に、理論及び実験から求めた比捕獲半径の値を表-3に示す。表-3中の $r_{\text{theo},1}$ はヘマタイトを常磁性体として計算した値であるが、実際には寄性強磁性体と考えられるので、(2)式の磁気力項を $\{1+(\alpha/2\mu_0 H_0 \chi_{\infty}) + (1+2\mu_0 \sigma_{\text{sat}}/r_0^2 + \beta/r_0^2)^{-1/2}\}$ (ただし、 α : 自発磁化、 χ_{∞} : 外挿推定した磁化率)により補正して計算した $r_{\text{theo},2}$ も示してある。なおらの計算に当っては K , N_g の値は小さいので無視した。 $r_{\text{theo},1}$ と $r_{\text{theo},2}$ を比較すると $r_{\text{theo},2}$ の方が実験値 r_{exp} との適合性がよいが、No.2とNo.3では30~40%の差を生じている。こうした相違の原因としては、(i) 粒子の粒径分布、流速分布を考慮していない、(ii) 流れ場としてポテンシャル流を用いている、(iii) ドラッグ力が必ずしもストークス式に従わない、(iv) 付着率=1としている、などが考えられるが、今後はこれら理論面とともに比捕獲半径を求める実験方法についてもさらに検討する必要がある。

最後に、本研究を遂行するにあたり多大の協力を頂いた名古屋大学電気工学科内山晋教授、川崎製鉄K.K.技術研究所内野和博氏、本学金属工学科中村研究室の方々に深謝致します。

〈参考文献〉 1) S. Uchiyama, et. al., IEEE Trans. Mag., Mag-15 (6), 1939 (1979).

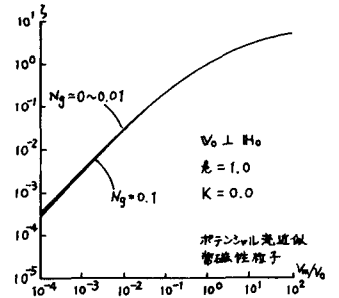


図-4. N_g の r に及ぼす影響

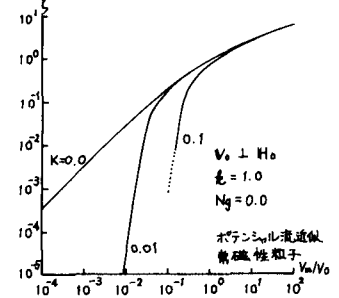


図-5. K の r に及ぼす影響

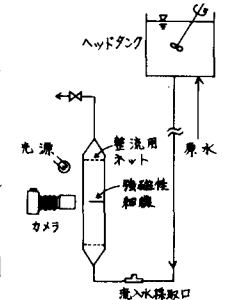


図-6. 実験装置

表-1. ヘマタイト粒子の諸元

平均粒径 $2b(\mu\text{m})$	1.6
密度 $\rho_p(\text{g/cm}^3)$	4.98
磁化率 $\chi(\text{emu/cm}^3/\text{Oe})$	1.10×10^{-4}

表-2. 実験条件

No.	$H_0(\text{kOe})$	$V_0(\text{cm/s})$	$K \times 10^{-3}$	$N_g \times 10^{-4}$	$(V_0/V_0)_1 \times 10^{-1}$	$(V_0/V_0)_2 \times 10^{-2}$
1	10	1.88	3.32	2.95	0.84	4.24
2	10	1.18	2.08	1.70	1.34	6.75
3	10	0.44	1.61	12.6	3.59	18.1

($V_0/V_0)_1$: 常磁性, ($V_0/V_0)_2$: 寄性強磁性

表-3. ヘマタイトの初期比捕獲半径

No.	$r_{\text{exp}} \times 10^{-2}$	$r_{\text{theo},1} \times 10^{-1}$	$\frac{r_{\text{exp}}}{r_{\text{theo},1}}$	$r_{\text{theo},2} \times 10^{-1}$	$\frac{r_{\text{exp}}}{r_{\text{theo},2}}$
1	7.45	1.33	0.56	0.71	1.05
2	11.7	2.73	0.43	1.95	0.60
3	17.4	3.27	0.53	2.40	0.73