

京大工学部 正員 寺島 泰
 " 正員 ○尾崎 博明
 大阪府 正員 西村 和弘

1. はじめに 筆者らは、高勾配磁気分離法(High Gradient Magnetic Separation : HGMS)について理論、応用の両面から研究を進めており、その成果の一部についてはすでに報告している。ここでHGMSとは、磁場中に強磁性細線等により構成されるフィルターを置くとその近傍に高い磁場勾配が発生することを利用し、通過する磁性粒子を強大な磁気力によりフィルターに捕捉する固液分離手段である。本報では、高勾配磁場中に複数本の磁性線を配置した場合の磁性線近傍における磁性粒子の挙動に関し、粒子軌跡計算法、各種パラメータの影響、また流れ場表現に注目した粒子軌跡の観察と計算結果との整合性、等について検討を行ったので報告する。

2. 配列磁性線近傍における粒子軌跡の計算 理論的な取扱いが容易な規則的な磁性線の配列形式としては図-1に示すようなものが考えられる。ある特定の磁性線(この中心を原点とする。)に接近する磁性粒子に磁気力 $\vec{F}_m$ 、流体抵抗力 $\vec{F}_d$ 、重力 $\vec{F}_g$ が作用するとき、運動方程式は、 $\vec{F}_m + \vec{F}_d + \vec{F}_g = \vec{0} \dots \textcircled{1}$ と表わされ、これを解くことにより粒子軌跡がもとまる。各力は次式で表わされる。(記号説明は後述。)

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \chi_s V \nabla (\vec{H} \cdot \vec{H}) \dots \textcircled{2} \quad (\vec{H} = -\nabla U) \quad (V: \text{粒子体積})$$

$$\vec{F}_d = 6\pi\eta b(\vec{v}_f - \vec{v}_p) \dots \textcircled{3} \quad (\vec{v}_f = (\frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial x}{\partial t})), \quad \vec{F}_g = \frac{m}{2} \cdot \pi b^3 (\rho_f - \rho_s) \vec{g} \dots \textcircled{4}$$

これらのうち磁性線の配列によって異なってくるのは $\vec{F}_m$ 、 $\vec{F}_d$ 、すなわち U 、 ψ の表現である。たとえば無限矩形配列において流れ場にポテンシャル流を用いると、 ψ は一樣流と個々の細線に対応するわき出しの重ね合わせとして次式で表わされる。

$$\psi = v_0 x - v_0 a^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{x - nd_1}{(x - nd_1)^2 + (y - md_2)^2} \dots \textcircled{5} \quad (n, m: \text{配列数})$$

磁気ポテンシャル U についても同様に次式で表わされる。

$$U = H_0 x + \frac{1}{2} H_0 a^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{x - nd_1}{(x - nd_1)^2 + (y - md_2)^2} \dots \textcircled{6}$$

⑤、⑥式において $m=0$ とおけば一次元配列における、また ∞ のかわりに有限値を与えれば有限矩形配列における表現がそれぞれ得られる。低 Re 数領域の流れ場としてクリーピング流(ψ の表現は後述)を用いる場合、上記のような重ね合わせは保証されないため、充填率が小さいときは孤立円筒まわりのそれがそのまま用いられるが、充填率が大きいときは彗原流れ²⁾を用いる等の方法が考えられる。なお粒子軌跡の数値計算は4次のルンゲ・クッタ法により行った。粒子軌跡計算例として無限矩形配列の場合の例を図-2に示す。

3. 各種パラメータと比捕獲半径 上記の計算方法を用いて、磁性線の配列間隔、配列数、あるいは Re 数等のパラメータが比捕獲半径(ξ)におよぼす影響を検討した。ここで比捕獲半径とは、図-2に示すように磁性線上に到達しうる粒子軌跡について、上流遠方(たとえば $Y=10.0$)における最大の X 座標を細線半径 a で規格化した無次元数($X_{\max}/a$)を表わす。 ξ を定める Y の値は通常10.0としているが、 a で規格化した細線間隔(d_2)が20以下のときは $Y = d_2/2$ のときの値を用いることとする。

(1) 細線間隔(d_1, d_2)、配列数(ID)と ξ の関係 (図-3、4)

矩形配列を例にとった図-3より、配列間隔が小さいときは流れの圧縮効果の影響を強くうけ、間隔が大きくなるにつれてその効果が弱くなる。図-3の条件では $d_1, d_2 < 10$ において磁性線配列の影響を強くうけている。配列数については図-4に示すように多少の影響はあるものの大きな影響は認められない。これは各磁

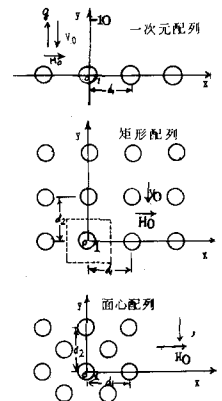


図-1. 規則配列の形式

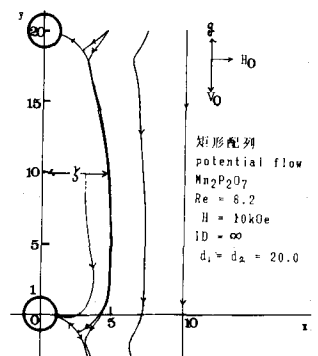


図-2. 矩形配列における粒子軌跡の例

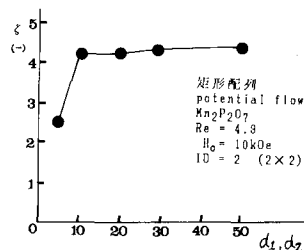


図-3. 矩形配列における配列間隔と ξ の関係

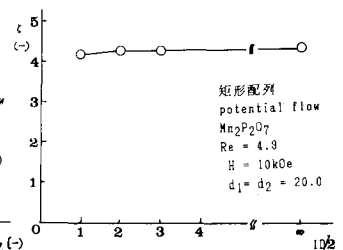


図-4. 矩形配列における配列数と ξ の関係

性線から粒子に作用する磁気力が相殺されるためと考えられる。

(2) Re数との関係 (図-5)

Re数の増加とともに ζ は減少し、値自体は孤立磁性線のそれより小さい。

(3) V_m/V_0 との関係 (図-6)

V_m とは、 $V_m = (2/9) \cdot \chi H M_s b^2 / (\eta a) \dots ⑦$ で表わされるパラメータであり速度の次元を有することから磁気速度とよばれる。図-6より、配列磁性線の場合は孤立磁性線の場合とは異なり、隣接細線の存在により V_m/V_0 が大きくなって値は微増するにとどまっている。

(4) 充填率 (F) と捕集効率

(Λ) の関係 (図-7)

Λ は細線間隔 d_1 を用いて $\Lambda = \zeta / (d_1/2)$ で定義され、またFは配列状態から計算できる。図-7のポテンシャル流の場合 ($Re=4.3$) は捕集効率が高いため孤立磁性線の ζ 値を用いて計算した破線と比較して大差はないが、クリーピング流を用いた場合 ($Re=1.2$) は、 $F > 2\%$ でかなりの差を生じており、条件によるものの Λ の計算に孤立磁性線の ζ 値を用いることができないことを示している。

4. 粒子軌跡の観察

(1) 実験装置と方法

実験装置は前報と同様であり、透明アクリル性の角柱状セル ($17\text{mm} \times 20\text{mm}$) 内に複数本の磁性線 ($a=500\mu\text{m}$ (SUS410)、あるいは $a=250\mu\text{m}$ (SUS430)) を水平に配置し、ピロリン酸マンガン粒子 (常磁性、 $\rho = 2.85\text{ g/cm}^3$, $\chi = 1.945 \times 10^{-6}\text{ emu/cm}^3/\text{Oe}$) を含む懸濁液を上向流 ($V_0=0.39 \times 10^{-2}\text{ m/sec}$) で流したときの粒子の挙動をビデオ装置により追跡した。磁場は10kOeとし、流れと磁性線の両方に垂直に印加した。

(2) 結果および数値計算との比較

一次元配列の場合の観察による粒子の限界軌跡と、計算によるそれとの比較を図-8、9に示す。軌跡の形状については、流れ場としてポテンシャル流を用いた軌跡の方が観察した軌跡に近いが、比捕獲半径については、とくにRe数が低い時はクリーピング流を用いた場合の ζ 値が観察により得たそれに近い値となっている。しかしながらRe数が大きくなるとポテンシャル流を用いて計算した ζ 値に近づいてくる傾向がみられる。矩形配列の場合については図-8と同条件 (ただし $ID=2(2 \times 2)$) では同図とほぼ同様の結果を得ている。また細線間隔が小さくなると図-10に示すように、観察あるいは計算結果の両方に軌跡のふくらみと細線後方へのまわりこみが少ないという特徴が表われている。

5. おわりに

HGMSの粒子軌跡計算に用いる流れ場については、Re数領域が各種流れ場近似の遷移領域にあるため、無条件に特定の流れ場を用いることには問題が多い。現在さらに広いRe数領域で実験および計算を行っている。

(参考文献) 1) たとえば 寺島、尾崎、西村: 第37回年講義要集, 193(1982)。

2) S. Kuwabara: J. Appl. Phys., 44(9), 527(1959)。

(記号)

a: 磁性線半径

b: 磁性粒子半径

d_1, d_2 : 細線間隔

F: 充填率

H_0 : 印加磁場

H: 磁場

ID: 軸方向の磁性線配列数

k: 反磁係数 ($M/2\mu_0 H_0$)

M, M_s : 磁化、飽和磁化

V_0, V_p, V_f : 表面流速、粒子速度、流体速度

ζ : 比捕獲半径

η : 流体粘度

Λ : 捕集効率

μ_0 : 真空中の透磁率

ρ_p, ρ_f : 粒子、流体の密度

χ_s : 比磁化率

ψ : 流れ関数, creeping flow では $\psi = (v_0 r / 2C_L) \{ (-1+a/r)^2 + 2\ln(r/a) \} \cos \theta$

$C_L = 1/(2.002 - \ln(Re))$

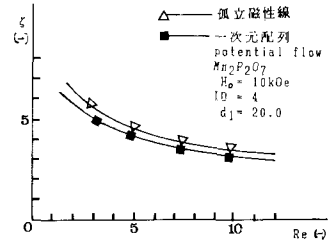


図-5. Re数との関係

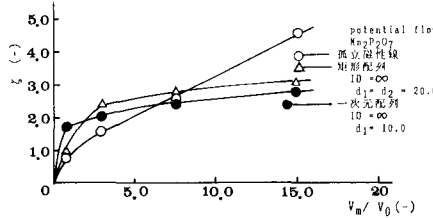


図-6. V_m/V_0 との関係

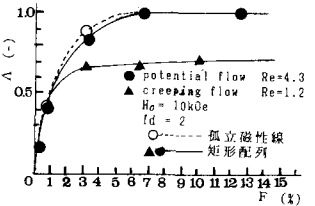


図-7. 矩形配列におけるFと Λ の関係

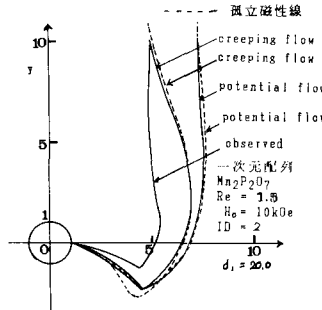


図-8. 観察と計算による限界軌跡の比較 (Re=1.5)

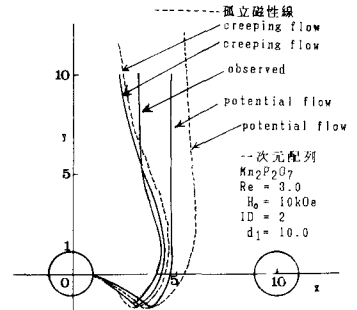


図-9. 観察と計算による限界軌跡の比較 (Re=3.0)

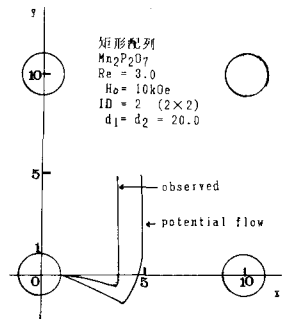


図-10. 観察と計算による限界軌跡の比較 (矩形配列)