

福山大学工学部紀要  
第2号 1980年3月

並流型大こう配磁気フィルタの性能に  
及ぼす磁性粒子付着たい積効果

栗 延 俊太郎\* · 内 山 晋\*\*

Particle Buildup Effect on Performance  
in Parallel Stream Type HGMS Filter

Shuntaro KURINOBU and Susumu UCHIYAMA

ABSTRACT

Particle buildup effect on filter performance in parallel stream type HGMS filter is investigated experimentally and compared with the theory. In the first place, the diameter of an isolated wire accumulated by paramagnetic hematite particles was measured as a function of time. The experimental results are found to agree well with the theory where a fitting parameter  $K$ , which is the ratio of the effective density of accumulated particles to the real density for bulk material, is determined to be  $0.33 - 0.36$ . Secondly the time dependence of the recovery is measured for two kinds of parallel stream type HGMS filters in which many thin ferromagnetic wires are arranged. Again the experimental results agree well with the theory.

---

\*電子電気工学科

\*\*名古屋大学工学部電気工学教室

### 1. まえがき

大こう配磁気分離技術は、単にスラリー中の常磁性粒子や強磁性粒子を回収、分離するだけのものではない。他の技術と組み合わせることにより、その応用分野は急速に広がっている。例えば、石炭液化の一方法である Solvent

Refined Coal 法 (SRC法) での化学反応を有効に利用した石炭の脱硫・灰分の除去<sup>(1)(2)(3)</sup>、Ti 化合物を用いた海水からのウラン回収<sup>(4)(5)</sup>、あるいは磁性流体を用いた比重分離<sup>(6)</sup>や含油廃水処理<sup>(7)</sup>への利用等多くの試みがなされている。

一方その中心となる大こう配磁気フィルタの性能を理論的、実験的に明らかにし、その性能を向上させることも必要不可欠であり、そのため多くの研究がなされている。

我々は、磁性線に磁性粒子が全く付着していない場合、並流型大こう配磁気フィルタの回収率（初期回収率）の実験結果が、理論とほぼ一致することを明らかにした<sup>(8)</sup>。しかし実際には、フィルタを使用するにつれて磁性粒子が磁性線上に付着たい積し、時間の経過と共に回収率が低下したり、目づまりが生じてスラリーの流量が減少してしまう。従って、一定時間の回収サイクルの後フィルタを洗浄しなければならない。このような磁性粒子の付着が、フィルタの性能にどのような効果を及ぼすか明らかにすることは、大こう配磁気フィルタを実際に使用する場合重要である。

並流型大こう配磁気フィルタ（以下並流型磁気フィルタ）では、磁性粒子の付着たい積過程からフィルタの回収率等に及ぼす効果が初期回収率の場合と同様ほとんど解析的な形で評価され、その動作特性を理論的に求めることができる。

本研究では並流型磁気フィルタの付着たい積効果を2つの点から実験的に調べ、理論と比較することによりその性能を明らかにする。

第一に、孤立した一本の磁性線に常磁性粒子が付着たい積する様子を実験的に調べ、磁性粒子付着たい積過程の基礎方程式から得られる理論と比較検討する。本文では以後この実験を実験Ⅰとする。第二に、磁性線を多数本規則正し

く配置した並流型磁気フィルタの回収率に及ぼす磁性粒子付着たい積効果を、回収率の時間変化を測定することにより評価し、その実験結果を理論と比較検討する。本文で以後この実験を実験Ⅱとする。

実験方法については、実験Ⅰと実験Ⅱは違いが余りないので、2でまとめて述べる。3、4で孤立磁性線の磁性粒子付着たい積効果に関する実験（実験Ⅰ）の結果とその理論との比較について、5、6で並流型磁気フィルタの回収率の時間変化に関する実験（実験Ⅱ）の結果とその理論との比較について述べる。7はむすびである。

### 2. 実験方法

実験方法は実験Ⅰ、実験Ⅱ共にほとんど同じなので、ここでまとめて述べる。

実験Ⅰでは一本の磁性線を磁界と垂直に張りそれと平行にヘマタイトのスラリーを流し、その流速  $v_0$ 、濃度  $N_{in}$  および印加磁界  $H_0$  を変えて、0～120分の範囲でその付着たい積効果を調べた。

本研究では磁性線に付着たい積した磁性粒子の磁気的作用は考慮していない。従って常磁性体であるヘマタイトの粉末を水に溶かしたスラリーを用いた。スラリーの作製法およびその濃度の測定方法は文献(8)に詳しく記してあるのでここでは省略する。

次にフィルタ (F) にスラリーを供給するシステムを図1に示す。タンク (A) とタンク (B) にヘマタイトのスラリーを入れる。タンク (A) の出口 (C) と (d) を通って落差に

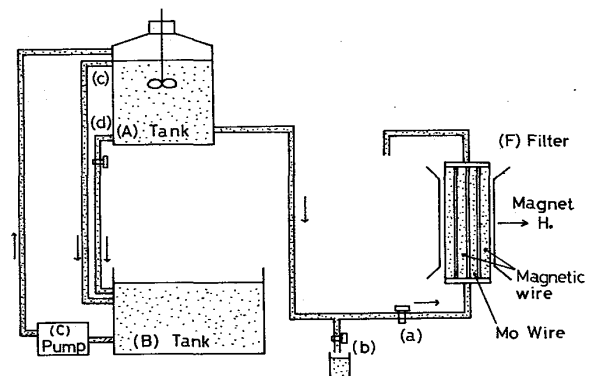


図1 磁気分離システムの模式図

ク (A) の出口 (C) と (d) を通って落差に

より自然にスラリーはタンク ( B ) へ入り, タンク ( B ) からポンプによりタンク ( A ) へくみ上げられる構造となっている。このような構造にしたのは, スラリー中のヘマタイト粒子を十分に分散させるためと, タンク ( A ) の水位をいつも一定にすることにより, フィルタへ流入するスラリー流速を一定にし, かつかくはん機によるヘマタイト粒子の分散を一定にするためである。

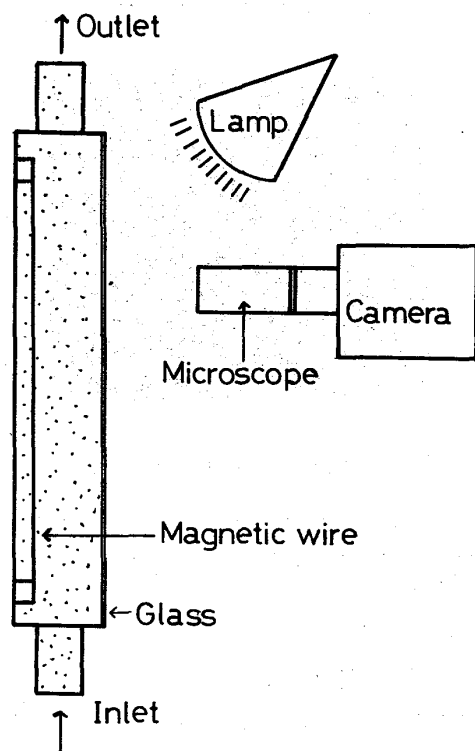


図2 磁性粒子付着による磁性線の径の時間変化を測定する装置

次にフィルタの構造について述べる。図2にフィルタを磁界と垂直な方向から見た模式図が示してある。一方の面にガラス板を張ったプラスチックケース中に半径  $50 \mu$  のステンレス磁性線を2本張り, それと平行に  $200 \mu$  のモリブデン線を張った。

このフィルタを電磁石中に配置し, フィルタ下側の入口からヘマタイトのスラリーを流入する。そして磁性線にヘマタイト粒子が付着たい積する様子を  $10 \sim 40$  倍に顕微鏡で拡大して写真撮影し, その変化を調べた。顕微鏡による像の拡大のため焦点深度の関係でピントずれを生じやすく, これを避けるための基準として常磁性のモリブデン線を張った。

次に実験Ⅱの実験方法について述べる。実験Ⅱでは磁性線を多数本規則正しく配置した並流型磁気フィルタを用い, その回収率の時間変化を測定した。実験Ⅱと実験Ⅰの実験方法で異なる点は次の2つのみであるので, それ以外は省略する。

第一は磁気分離システムに関することである。実験Ⅰに用いたフィルタは, フィルタ断面に比べ付着たい積する磁性粒子の体積が非常に小さいので, スラリーの流量が時間と共に減少することはないが, 実験Ⅱでは後述するように, フィルタに磁性粒子が付着たい積することによりフィルタ中のスラリーの流れる断面積が減少する。理論と比較するためには, スラリーを定流量でフィルタへ流入する必要がある。従って図1のコック ( a ) と出口 ( b ) の間に, ピストン型の微量定流量ポンプとエアードンパーを入れ, スラリーをフィルタへ定流量で流入するシステムにした。

第二は使用したフィルタが異なる点である。ここでは, 平行線並流型磁気フィルタⅠと網並流型磁気フィルタを用いた。その緒元は表1に

表1 フィルタの製作条件

フィルタの名称	スペーサーの厚み $d_1$ (mm)	エレメントに張った 磁線間の長さ $d_2$ (mm)	占積率F
平行線並流型 磁気フィルタⅠ	0.42	0.51	0.038
網並流型磁気フィルタ	0.46	0.50	0.034

示してある。製作方法, 構造は文献(8)に詳しく記してあるので, ここでは省略する。

これら2つの並流型磁気フィルタをそれぞれ電磁石中に配置し, 下側の入口からヘマタイトのスラリーを流入し, 一定時間ごとにフィルタの入口 ( 実際は定流量ポンプの入口 ) と出口のスラリー濃度を測定し, 回収率の時間変化を求めた。

### 3. 孤立磁性線の磁性粒子付着たい積効果の実験結果

孤立磁性線の磁性粒子付着たい積効果の実験(実験I)の実験結果について述べる。図3にヘマタイト付着による磁性線の径の時間変化の結果を示す。この場合の実験条件は表2に示し

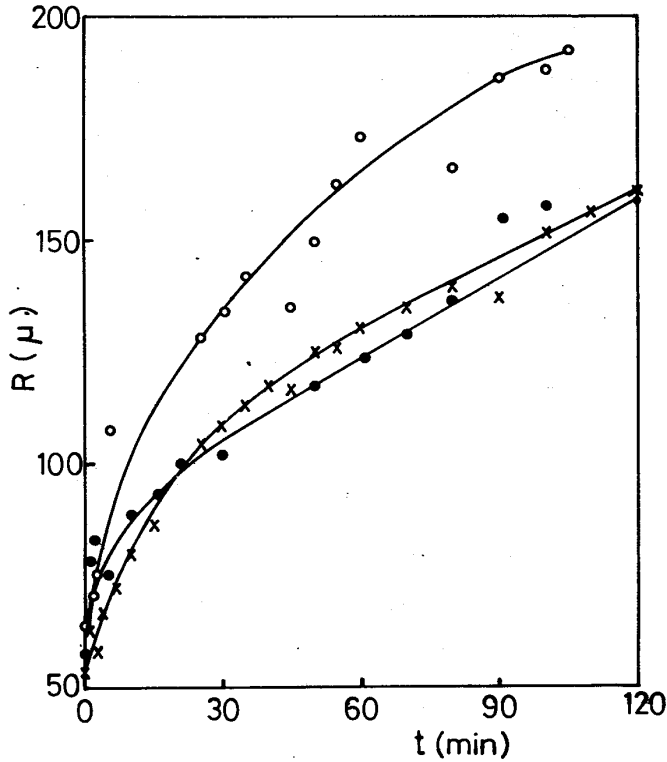


図3 ヘマタイト付着による磁性線の径の時間変化

表2 (図3の説明)

記号	流速 $v_0$ (m/sec)	濃度 $N_{in}$ (ppm)	粒子径 $b$ ( $\mu$ )	印加磁界 $H_0$ (A/m)	$K$	$\tau$ (sec)
○	0.006	186	0.7	$8 \times 10^5$	0.36	377
×	0.002	111	0.6	$8 \times 10^5$	0.34	411
●	0.008	69	0.8	$4 \times 10^5$	0.33	711

である。又図3の×印の測定を行った際、付着開始4分後と100分後のヘマタイトの付着した磁性線とモリブデン線(200 $\mu\phi$ )の写真が、それぞれ図4(a),(b)に示されている。

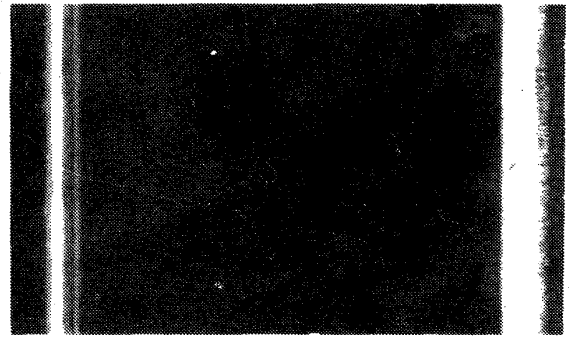


図4 (a)付着開始4分後



図4 (b)付着開始100分後

図4 ヘマタイトの付着した磁性線(左)と比較のための200 $\mu\phi$ のモリブデン線(右)の写真

### 4. 理論と実験結果の比較

孤立磁性線に磁性粒子が付着たい積した際の断面の形は、次式により与えられる<sup>(9)</sup>

$$R_a^4 = \frac{1}{2} \{ 1 + 4t^* \cos 2\Theta + (1 + 8t^* \cos 2\Theta + 16t^{*2}) \frac{1}{2} \} \quad (1)$$

$$R_a = R/a \quad (2)$$

$$t^* = \frac{t}{\tau} = \left( \frac{N_{in} v_m}{K \rho_p a} \right) t \quad (3)$$

$$v_m = \frac{2\chi_s M_s H_0 b^2}{9\eta a} \quad (4)$$

ここで、 $R$ は時間 $t$ において磁性線に付着たい積した磁性粒子の半径で、 $R_a$ はそれを磁性線の半径 $a$ で規格化したものである。又 $v_m$ は磁気速度と呼ばれる。 $\rho_p$ 、 $\chi_s$ はヘマタイトの密度と比磁化率、 $b$ 、 $N_{in}$ はスラリー中のヘマタイトの粒子径と濃度、 $H_0$ は印加磁界、 $M_s$ は

磁性線の飽和磁化,  $\eta$  は水の粘性係数,  $K$  は磁性線上に実際に付着たい積している磁性粒子の実効密度  $\rho_{eff}$  とバルクの密度  $\rho_p$  の比  $\rho_{eff}/\rho_p$  である。

スラリーの流入点からの磁性線の長さを  $Z$  とすると, その付着断面では  $\Theta$  に次の関係がある。

$$-\Theta_M \leq \Theta \leq \Theta_M \quad (5)$$

$$\cos 2\Theta_M = \left( \frac{Zv_m}{av_0} - \frac{t}{\tau} \right) / \left( \frac{Zv_m}{av_0} + \frac{t}{\tau} \right) \quad (6)$$

ここで  $v_0$  はスラリー流速である。

前述の実験結果は, 磁界に垂直な方向からヘマタイト付着による磁性線の径の変化を測定しているのので, 式(1)で  $\Theta = 0$  としたときの  $R_a$  に対応している。図5において, 実線は理論曲線であり,  $\circ, \bullet, \times$  の各印で示す点は実験結果

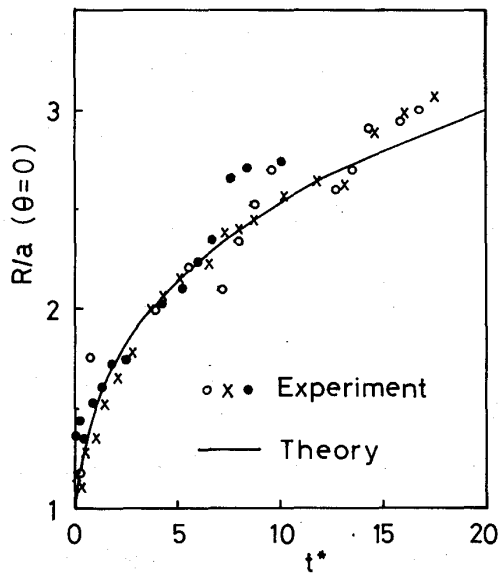


図5 ヘマタイト付着による径の時間変化の理論との比較

で, 図3の結果を  $R, t$  共に規格化して  $R_a$  対  $t^*$  に書き改めたものである。式(3)から  $\tau$  を求めるのに  $\rho_p = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$ ,  $\eta = 1.2 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{sec}$  ( $15^\circ \text{C}$ ) で,  $b, H_0, N_{in}$  は表2の値を用いた。  $K$  の値を実験で求めるのはむづかしく, フィッティングパラメーターとした。実験と理論が最も良く一致する  $K$  の値は,  $0.33 \sim 0.36$  であり, これは物理的に妥当な値であると考えられる。これらの数値は併せて表2に示してある。

以上のように孤立磁性線の付着たい積過程における理論<sup>(9)</sup>と実験結果は良く一致し, 理論が妥当なものであることが確認された。

一方スラリーの流入点からの磁性線の長さを  $Z$  とすると, その付着断面の形は式(1)で, その  $\Theta$  の範囲は式(6)で与えられる。図6は, 図3の

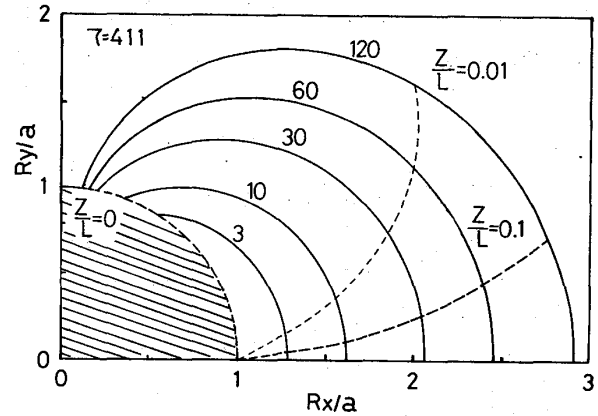


図6 付着断面の計算例

$\times$ 印の測定に対応した条件の下で,  $Z/L = 0, 0.01, 0.1$  の位置における付着断面の形を計算したものである。ただし,  $R_x/a$  は印加磁界に平行にとってあり, 斜線を施した部分は磁性線の断面を示す。曲線に沿って記入した数値はスラリー流入後の時間を分単位で表わし, 破線は各  $Z/L$  に対する付着断面の範囲を示す。

### 5. 並流型磁気フィルタの回収率の実験結果

並流型磁気フィルタの回収率の時間変化を測

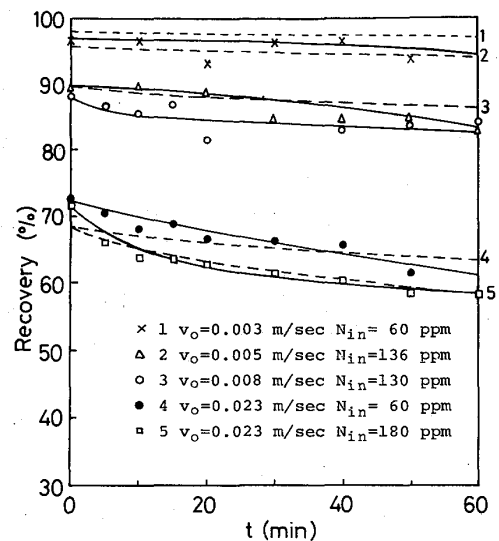


図7 平行線並流型磁気フィルタの回収率の時間変化

定した結果を示す。図7は平行線並流型磁気フィルタの回収率Rの時間変化を実験条件を変えて測定したものである。記号が実験結果で、その実験条件が図中に示してある。ここで  $N_{in}$  はフィルタ入口のスラリー濃度、 $v_0$  は  $t=0$  の際の流速（初期流速）である。印加磁界  $H_0$  はすべて  $8 \times 10^5$  A/m 一定である。図8、図9に網並流型磁気フィルタの回収率の時間変化を

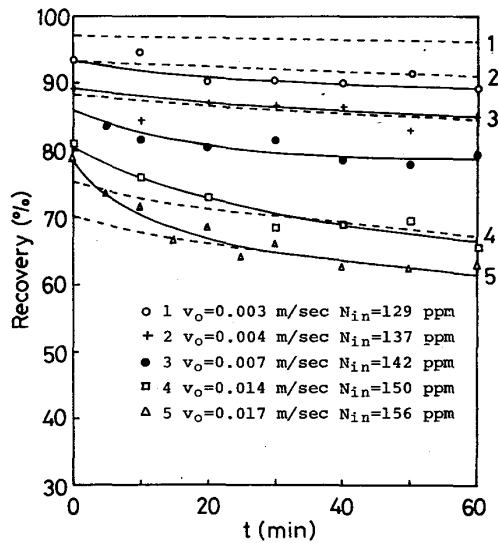


図8 網並流型磁気フィルタの回収率の時間変化（スラリー流速  $v_0$  の効果）

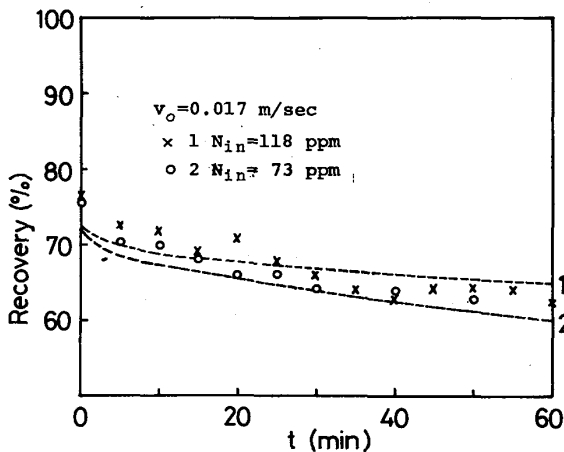


図9 網並流型磁気フィルタの回収率の時間変化（スラリー濃度  $N_{in}$  の効果）

示す。図8は  $H_0$  を  $8 \times 10^5$  A/m、 $N_{in}$  をほぼ 150 ppm 一定に保ち  $v_0$  を変えた場合であり、図9は  $H_0$  を  $8 \times 10^5$  A/m、 $v_0$  を 0.017 m/sec 一定に保ち、 $N_{in}$  を変化させた場合である。

図7～図9から、平行線並流型磁気フィルタは、網並流型磁気フィルタと同様の特性を示すことがわかる。

これらの特徴をまとめると、

- (i) 回収率 R は時間と共に低下する。
- (ii) 初期回収率は初期流速  $v_0$  が速い程低い。
- (iii) 初期流速  $v_0$ 、印加磁界  $H_0$  が一定で、スラリーの濃度  $N_{in}$  だけ異なる場合、初期回収率は同じであるが、一定時間後の回収率は濃度が高い方が低い。

## 6. 理論と実験結果の比較

最初に並流型磁気フィルタの回収率の時間変化の理論的な計算方法について述べる。一定流量のスラリーをフィルタへ流入した場合、時間  $t$  での比捕獲断面積  $S_c^*(t)$  と最大比付着断面積  $S_{pM}^*(t)$  は、次式で与えられる。<sup>(10)</sup>

$$S_c^*(t) = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{Lv_m}{av_0} \left( \frac{S^* - S_{pM}^*(t) - 1}{S^* - 1} \right)} + \frac{t}{\tau} \quad (7)$$

$$S_{pM}^*(t) = \frac{4}{\pi} \frac{t}{\tau} \quad (t \gg \tau) \quad (8)$$

$$S^* = d_1 d_2 / \pi a^2 \quad (9)$$

ここで、 $L$  はフィルタの長さで、 $d_1$  はフィルタエレメント間のスペーサーの厚みであり、 $d_2$  はフィルタエレメントに張った磁性線間の長さである。

まず実験条件から  $S_c^*(t)$  と  $S_{pM}^*(t)$  が計算される。なお  $S_{pM}^*(t)$  を与える式(8)は  $t^* \gg 1$  に対する表式であり、 $S_{pM}^*(t)$  は式(1)、式(6)で囲まれる部分の面積であるから、式(1)からシンプソン公式による数値積分で、任意の  $t^*$  に対する  $S_{pM}^*(t)$  を算出した。これらの計算に必要な諸数値を表3にまとめて示す。

表3 計算に用いた諸数値

	記号	値
磁性線の半径	$a$	$5 \times 10^{-5}$ m
磁性線の長さ	$L$	0.1 m
磁性線の磁化	(並流)	$M_s$ 1.7 T ( $H_0 = 8 \times 10^5$ A/m)
	(網)	$M_s$ 1.9 T ( $H_0 = 8 \times 10^5$ A/m)
磁性粒子の平均粒子径	$b$	$0.76 \times 10^{-6}$ m
磁性粒子の比磁化率	$\chi_s$	$1 \times 10^{-3}$
磁性粒子の密度	$\rho_p$	$5 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{eff} / \rho_p$	$K$	0.88
水の粘性係数	$\eta$	$1.2 \times 10^{-3}$ kg/m sec (15°C)

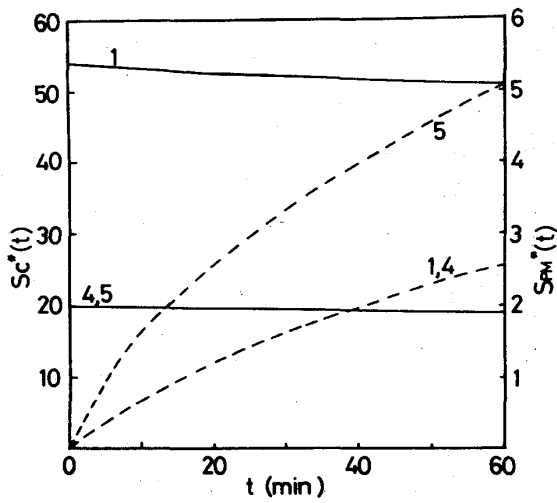


図 10 比捕獲断面積  $S_c^*(t)$  と最大比付着断面積  $S_{pM}^*(t)$  の時間変化の計算例

まず  $S_c^*(t)$  と  $S_{pM}^*(t)$  の計算例を図 10 に示す。図 10 中の数字 1, 4, 5 は、図 12 に示す平行線並流型磁気フィルタの時間変化の実験結果における実験条件を用いて計算したものである。実線は  $S_c^*(t)$ 、破線は  $S_{pM}^*(t)$  の時間変化を示す。K は 3 節で述べたように、実験的に  $0.33 \sim 0.36$  と求められたが、 $0.33$  と  $0.36$  の  $S_c^*(t)$  と  $S_{pM}^*(t)$  への寄与は高々 1% 程度である。実験条件 1 および 4 は等濃度 (60 ppm) の場合であり、4 および 5 は等流速 (0.023 m/sec) の場合である。等流速の場合、 $S_c^*(t)$  の時間変化の濃度依存性は余り顕著でない。これは測定時間が短いためであろう。一方等濃度の場合、流速が大きくなる程  $S_c^*(t)$  が小さくなるが、 $S_{pM}^*(t)$  は濃度  $N_{in}$  のみに依存する量であるから、等濃度では同じ時間依存性をもつことになる。

次にこのように計算した  $S_c^*(t)$  と  $S_{pM}^*(t)$  を用いて回収率 R を計算する。本研究でも初期回収率の場合<sup>(8)</sup>と同様磁性線は三角形状に配置していると仮定した。

図 11 に  $Z=0$  (フィルタ入口) における  $S_c^*(t)$  と  $S_{pM}^*(t)$  の計算例が示されている。 $S_c^*(t)$  の形は次式で与えられ、 $S_{pM}^*(t)$  は式 (1)、式 (6) で与えられる。

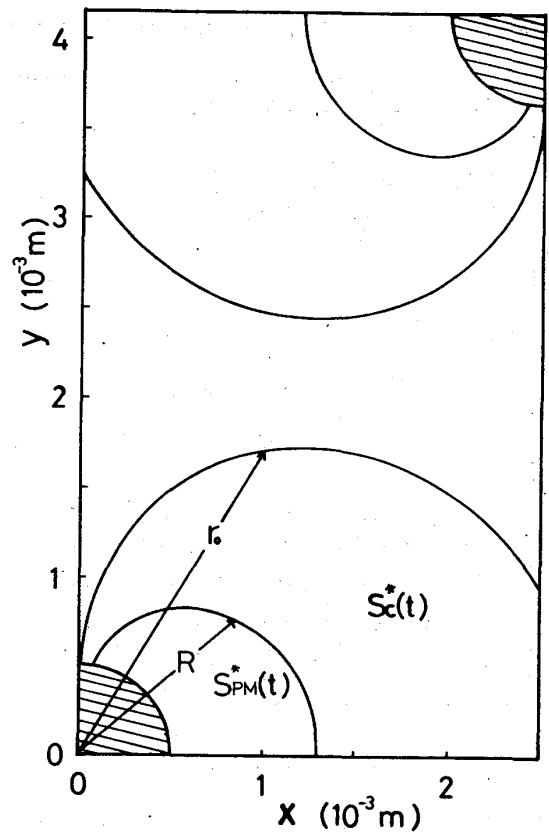


図 11 磁性粒子が付着たい積した場合のフィルタ断面の計算例

$$r_0^2 = \frac{\pi}{2} S_c^*(t) \cos \Theta_0 \quad (10)$$

なおこの図は、図 12 に示す実験結果の実験条件から求めたもので、3 の 30 分後の状態に対応している。

磁性粒子が付着たい積している場合の回収率計算において、 $S_c^*(t)$  が小さく隣接磁性線の  $S_c^*(t)$  と変らない場合 (図 11 参照) は、有効比捕獲断面積  $S_{ceff}^*(t) = S_c^*(t)$  とし、磁性線の捕獲断面積  $(S_{ceff}^*(t) - S_{pM}^*(t) - 1)$  をスラリーが流れる断面積  $(S^* - S_{pM}^*(t) - 1)$  で割って、回収率 R が定義される。

$$R = \frac{S_{ceff}^*(t) - S_{pM}^*(t) - 1}{S^* - S_{pM}^*(t) - 1} \times 100 (\%) \quad (11)$$

ここで  $S^*$  は占積率 F の逆数である。 $S_c^*(t)$  が大きく隣接磁性線の  $S_c^*(t)$  と重なりを生じた際は、重なり面積の半分を差引き、これを  $S_{ceff}^*(t)$  とすれば良い。これは初期回収率の場合と全く同じ計算方法である。<sup>(8)</sup>

以上述べたようにして  $S_c^*(t)$  と  $S_{PM}^*(t)$  から回収率を計算した結果と、実験結果を比較する。

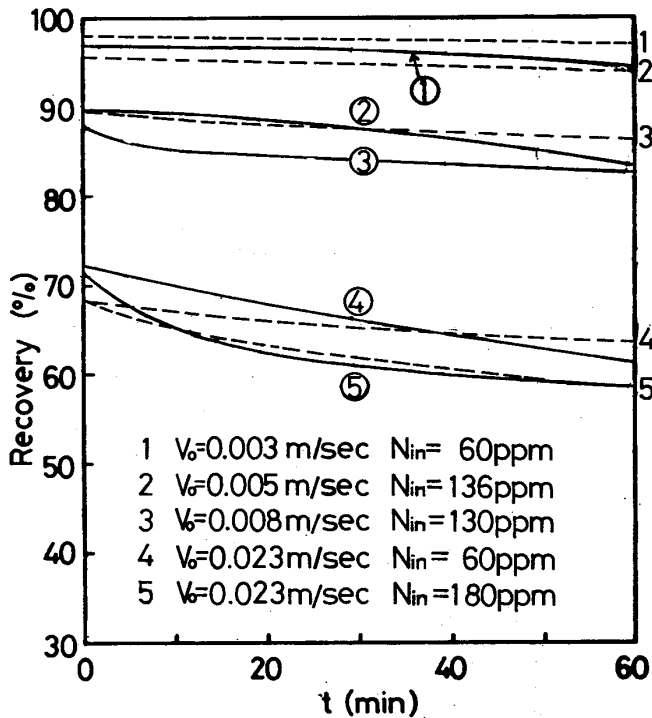


図 12 平行線並流型磁気フィルタの回収率の時間変化の実験（実線）と理論（破線）との比較

図 1 2 に図 7 に示した平行線並流型磁気フィルタの回収率の時間依存性を測定した実験結果（実線）とそれに対応する理論値（破線）を比較したものを示す。図中の番号は、曲線の下に記した異なる 5 種の測定条件に対応する。又図 1 3, 図 1 4 はそれぞれ図 8, 図 9 に示した網並流型磁気フィルタに対する実験値と理論値を比較したものである。これらの図から分ることを列記すると、次のようになる。

- (i) 初期回収率  $R(t=0)$  の実験と理論の一致は、スラリー流速  $v_0$  が大きい程良くなる傾向がある。
- (ii) 回収率  $R$  の時間依存性、特に初期回収率の低下の時間依存性は、 $v_0$  が大きいとき実験と理論の一致が悪い。スラリー流速  $v_0$  が小さいときは、理論と実験は類似の時間依存性をもつが、常に実験値が理論値を下まわっている。
- (iii) 濃度  $N_{in}$  に対する回収率  $R$  の時間依存性は図 1 2 の 4, 5 および図 1 4 に示すように、どちらも流速  $v_0$  の速い場合であり、理論と

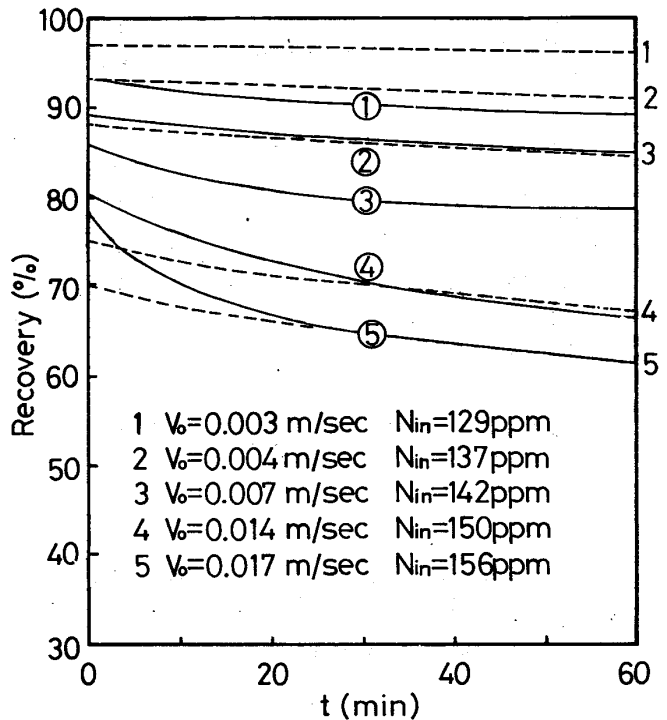


図 13 網並流型磁気フィルタの回収率の時間変化の実験（実線）と理論（破線）との比較（スラリー濃度  $N_{in}$  の効果）

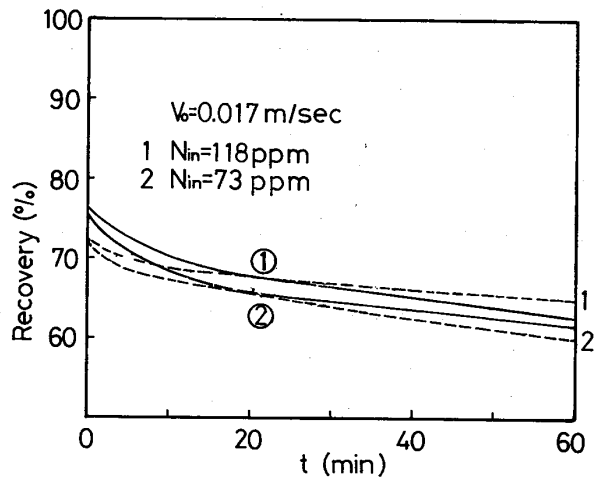


図 14 網並流型磁気フィルタの回収率の時間変化の実験（実線）と理論（破線）との比較（スラリー濃度  $N_{in}$  の効果）

実験はほぼ一致している。

このように細かく見ると理論値と実験値の間に相違が見られるが、その差は 10% 以内であり、両者の一致は満足に足るものといえよう。



## 7. むすび

以上述べたように、磁性粒子付着たい積効果による並流型磁気フィルタの性能の変化を実験的に調べ、理論と比較検討した。

最初磁性粒子の付着たい積による孤立磁性線の径の変化を測定した。実験結果は、付着たい積した磁性粒子の密度とそのバルクの密度の比  $K$  をフィッティングパラメーターとすると、理論と良い一致を示した。得られた  $K$  の値は、 $0.33 \sim 0.36$  であり、物理的に妥当なものである。

次に磁性線を規則正しく配置した平行線並流磁気フィルタと網並流型磁気フィルタを用い、回収率の時間変化を測定した。初期回収率の場合と同様磁性線が三角形に配置してであると仮定すると、実験結果は理論とほぼ一致した。又網並流型磁気フィルタはスラリーと直交する磁性線があるにもかかわらず、平行線並流型磁気フィルタと同様の特性を示すことがわかった。

以上のことから、捕獲対象とされる粒子径と磁化率が既知であれば、有効かつ経済的な磁気フィルタが理論的に設計できることが明らかにされた。

又スラリーの流れ方向が磁性線と直交している直交型磁気フィルタの付着たい積過程についても、多くの研究が行なわれている。<sup>(11)~(14)</sup>しかし流体の流れの場が複雑なので、その理論的解析はむずかしく、十分に明らかにされていない。直交型磁気フィルタは、実際に広く利用されており、今後その付着たい積効果に関する研究が必要である。

最後に、本研究は名古屋大学工学部技官熊沢正幸氏と共に行ったものであり、深く感謝します。試料の提供など実験の推進に御助力いただいた矢野純一氏をはじめ大同特殊鋼(株)の諸氏に感謝の意を表します。

また御討論いただいた豊橋技術科学大学藤井壽崇教授、名古屋大学網島滋講師はじめ同大学内山研究室の各位に深謝します。

## 《文 献》

- (1) E. Maxwell and D. R. Kelland : IEEE Trans. Magn., MAG-12 (1976) 507
- (2) R. R. Oder : IEEE Trans. Magn., MAG-12 (1976) 532
- (3) L. Petrakis, P. F. Ahner and F. E. Kiviat : Proc. of an International Conf. on Industrial Application of Magnetic Separation, New Hampshire P95 (1978)
- (4) 岡本祥一他 : 化学プロセスへの磁気分離の応用に関する理研シンポジウム論文集 P19 (1978)
- (5) 藤田一紀 : 化学プロセスへの磁気分離の応用に関する理研シンポジウム論文集 P30 (1978)
- (6) 下飯坂潤三, 中鉢良治, 吉田良一 : 日本鉱業会誌 93 (1977) 83
- (7) 下飯坂潤三 : 化学プロセスへの磁気分離の応用に関する理研シンポジウム論文集 P34 (1978)
- (8) 栗延俊太郎, 内山晋, 高安真 : 福山大学工学部紀要 1 (1979) 26
- (9) S. Uchiyama, S. Kurinobu, M. Kumazawa and M. Takayasu : IEEE Trans. Magn., MAG-13 (1977) 1490
- (10) S. Uchiyama, S. Kurinobu, M. Takayasu and T. Fujii : IEEE Trans. Magn., MAG-13 (1977) 1493
- (11) F. E. Luborsky and B. J. Drummond : IEEE Trans. Magn., MAG-11 (1975) 1676
- (12) F. E. Luborsky and B. J. Drummond : IEEE Trans. Magn., MAG-12 (1976) 895
- (13) C. Cowen, F. J. Friedlaender and R. Jaluria : IEEE Trans. Magn., MAG-13 (1976) 466
- (14) 内山晋, 熊沢正幸, 清水教敬, 村瀬知良 : 第3回応用磁気論文集 P44 (1979)