磁石数と配置間隔が磁気分離性能に
及ぼす影響に関する数値解析的研究*森 田 穰^{*1}, 磯 上 尚 志^{*1}A Numerical Study on the Effect of Number and Interval of
Magnets on Magnetic Separation PerformanceMinoru MORITA^{*2} and Hisashi ISOGAMI^{*2} Matsudo Research Laboratory, Hitachi Plant Technologies, Ltd.,
35 Kami-Hongo, Matsudo-shi, Chiba, 271-0064 Japan

We conducted a two-dimensional numerical simulation of ferromagnetic floc motion (coagulated particles containing ferromagnetic particles) in a magnetic field and a flow field to analyze the effect of number and filling rate of magnets on magnetic separation performance. In the present study, we used magnetic fields applied by permanent neodymium magnets. The calculation results show that the magnetic separation performance is more greatly influenced by the number than the dimensionless interval of permanent magnets. The results also show that the logarithm of the residual rate of ferromagnetic flocs is approximately proportional to the number of applied magnets. Commercial soft wares, Star-CD and ELF-MAGIC, are used for numerical analysis on fluid and magnetic filed in this study.

Key Words: Numerical Analysis, Liquid-Solid Two-Phase Flow, Environmental Engineering

1. 緒 言

汚濁水の高速浄化法の一つとして、マグシード法による磁気分離法がある^{(1)~(4)}。マグシード法とは、本来磁性を有しない被除去物に磁性粒子と凝集剤を添加して磁性フロック（被除去物と磁性粒子を含んだ凝集体粒子で、以下フロックと称する）を生成し、磁性粒子とともに被除去物を磁気力により分離する方式であり高速水処理に適した方法である。この磁気分離装置の最適設計には、流れ場と磁場が与えられた中でのフロックの挙動を計算する方法が必要である。このフロックの挙動計算には、フロックの浮力を計算するための密度、流体力を計算するための流体抵抗係数、フロックに働く磁気力を計算するためのフロックの磁化を知ることが不可欠である。そこで筆者らは、これらの物性値計測等を行い、丹保⁽⁵⁾らの研究も用いてフロックの挙動計算モデル化を行った⁽⁶⁾。また、沈降分離が扱うような大きさや方向が一定の重力場と異なり、磁気分離では、フロックの存在位置と運動方向によっては、フロックを加速減速するような磁気力の分布が存在する。先の研究では⁽⁶⁾、磁石が1個存在する場合の磁気力場における計算と実験との比較検証を行ったが、磁石が複数存在する場合について、磁石の個数と磁石の配置方法がフロックの挙動に及ぼす影響を明らかにし

ていなかった。そこで本論文では、二次元的に複数存在する磁石によって印加される磁気力場が存在する空間でのフロックの挙動を計算する。そして、磁石の個数、及び磁石配置のパラメータである無次元磁石配置間隔の逆数が及ぼす影響の数値解析による二次元的解析を行い、磁気分離の二次元的理論構築を試みた。本解析では、壁面に磁石が配置された二次元流路を対象モデルに選んだ。

2. 記号・単位

C_D	: フロックの抗力係数
C_V	: 仮想質量係数
D_P	: フロック径 (m)
F	: 無次元磁石配置間隔の逆数
g	: 重力加速度 (m/s^2)
$\vec{H}$	: 磁場ベクトル (A/m)
H	: 磁場強度 (A/m)
k_R	: 消滅定数 (1/s)
L_1	: 磁石中心間距離 (m)
L_2	: 磁石面間距離 (m)
$\vec{M}_P$	: フロックの磁化ベクトル (Wb/m^2)
$\vec{M}_F$	: 磁性粒子の磁化ベクトル (Wb/m^2)
M_F	: フロックの磁化強度 (Wb/m^2)
M_P	: 磁性粒子の磁化強度 (Wb/m^2)
N	: 磁石個数

* 原稿受付 2009年11月26日。

^{*1} 正員, (株)日立プラントテクノロジー松戸研究所(〒271-0064 松戸市上本郷537)。

E-mail: minoru.morita.ew@hitachi-pt.com

- Q : 流路内通過流量 (m³/s)
 R : フロックの除去率
 Re : レイノルズ数
 U : 流体の平均流速 (m/s)
 $\vec{u}$: 流体の流速ベクトル (m/s)
 $\vec{v}$: フロック速度ベクトル (m/s)
 V_P : フロック体積 (m³)
 w : 流路幅 (mm)
 γ : フロック中の磁性粒子体積含有率
 μ_0 : 真空の透磁率 (H/m)
 ρ_P : フロックの密度 (kg/m³)
 ρ_W : 流体の密度 (kg/m³)
 τ : 通過時間 (s)

3. フロックの挙動解析方法

3・1 基礎方程式 本計算では、フロック間の影響（衝突合体）が無く、フロックが流体の運動に影響を及ぼさないと仮定する。即ち、流体の運動と磁気力を含む外力が磁性フロックの運動に及ぼす影響のみを考慮するモデルを採用した。

流れ場は標準型の $k-\varepsilon$ モデルにより計算した結果を用いた。また本解析では、時間微分をゼロとした定常状態で、かつ二次元の流れ場を計算した。計算には市販流体解析ソフトである Star-CD を用いた。

式 (1) にフロックの運動方程式を示し、式 (2) から式 (6) に各項を示す。左辺は式 (2) に示す慣性項、右辺第 1 項は式 (3) に示す流体抗力項、右辺の第 2 項は式 (4) に示す重力と浮力の項、そして第 3 項は式 (6) に示す磁気力項⁽¹⁾⁽⁵⁾である。一般にフロックの密度は水の密度に近い⁽⁴⁾⁽⁵⁾、仮想質量の効果が無視出来ないと考えられるので慣性項には仮想質量項を加味した。フロックの密度は、 $1.01 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の範囲⁽⁵⁾と考えられるため、本計算ではフロックの密度を中間値の $1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ で与えた。また、仮想質量係数は球体の仮想質量係数 0.5 で近似した。式 (3) 中の抗力係数は、次の式 (5) で表した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

$$\vec{F}_I = \vec{F}_D + \vec{F}_G + \vec{F}_M \quad (1)$$

$$\vec{F}_I = (\rho_P + C_V \cdot \rho_W) \cdot \frac{d}{dt} \vec{v} \quad (2)$$

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} \rho_W \cdot \frac{\pi \cdot D_p^2}{4} \cdot C_D \cdot |\vec{v} - \vec{u}| (\vec{v} - \vec{u}) \quad (3)$$

$$\vec{F}_G = (\rho_W - \rho_P) \cdot \frac{\pi \cdot D_p^3}{6} \cdot \vec{g} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{45}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad (5)$$

$$\vec{F}_M = \frac{1}{2} V_P \cdot \text{grad} (\vec{M}_P \cdot \vec{H}) \quad (6)$$

図 1 に示すように、磁性粒子はフロック中に点在しており、磁場が直接作用するのはフロック中の磁性粒子であり、磁化は単位体積あたりの物理量であるので、

式 (7) に示すようにフロックの磁化は磁性粒子の磁化ベクトルにフロック中に存在する磁性粒子の体積比率 γ を乗じたものとなる。

$$\vec{M}_P = \gamma \cdot \vec{M}_F \quad (7)$$

$$\vec{F}_M = V_P \cdot \gamma \cdot M_F \cdot \text{grad} (H) \quad (8)$$

Fig.1 Schematic figure of ferromagnetic floc

また、磁性粒子の大きさは数ミクロンで微小であることから、磁性粒子の磁化ベクトルの方向は、その位置における磁場の方向と同じであると近似する。従って、スカラー場である磁場強度と磁性粒子の磁化を用いて、式 (6) は式 (8) のように変形される。

図 2 に、磁性粒子（四三酸化鉄）の磁化計測値、文献値、及びモデル曲線を示す。磁化計測は試料振動型磁力計を用いて行った。強磁性体の磁化は外部印加磁場強度を高めるに従い飽和するが、計測では 0.52 Wb/m^2 で磁化が飽和した。一方、文献値⁽⁷⁾では四三酸化鉄の飽和磁化は 0.6 Wb/m^2 であることが知られている。そこで、飽和磁化をこれらの値の中間値 0.56 Wb/m^2 とし、式(9)の磁化モデル曲線による磁化特性を採用した（図 2 参照）。

$$M_F = 0.56 \cdot (1 - e^{-8.11 \cdot H}) \quad (9)$$

Fig.2 Magnetization curve of tri-iron tetra-oxide

図 3 に、解析モデルの模式図を示す。本研究では流路の両側に磁石を配置する場合と、片側のみに配置する場合を扱った。図 3 (a) に磁石を流路片側のみに配置した場合、図 3 (b) に磁石を流路両側に配置した場合を示す。なお、磁石の極性の配置については、図 3 に示すように隣り合う磁石の極性が異なるように配置し、流路を挟んで対向する磁石同士の極性も異なるように配置した。図 3 に示す流路の幅 w は 25 mm、壁面厚さ p は 3mm で与えている。流路の外側に磁石を配置し、流れ場の存在する領域に磁場を印加する。本解析

では、 z 方向（紙面に対して上方向）に関する流路の中央断面領域において、前述の流れ場、及び磁気力分布を用いたブロック挙動の2次元計算を行った。流路に磁性ブロックを入射させブロックの挙動を計算すると、流路壁面に磁気力で付着し流路内に留まるブロック数と、除去されないで流路から流出するブロック数が求まる。ブロックの除去率は、入射ブロック数と流出ブロック数の比により求めた。

Fig.3 Schematic figure of calculation model

磁場は等価磁化電流法により計算した。等価磁化電流法を用いれば、任意の位置での磁場を数値積分で求められる利点があることから、本手法を採用した。本解析では図3に示すような直方体の永久磁石（ネオジウム磁石、磁化 1.24 Wb/m^2 ）を磁場印加源とした。ここでは、市販品の永久磁石の中でも比較的標準的なサイズである、 $a=25\text{mm}$ 、 $b=50\text{mm}$ 、 $c=15\text{mm}$ の磁石をモデルに採用した。また本磁場解析には、市販計算ソフトであるELF-MAGICを使用した。磁場計算では、前述の通り図3の流路において z 方向に関する流路中央の2次元断面領域について磁場分布を算出し、磁場強度及び磁気力の x 及び y 成分を算出した。また、本計算では磁場解析の計算出力点である格子点を直角格子で与え、算出した磁場分布の各計算出力点において、その近傍の磁場分布のデータから中心差分を用いて磁場勾配を算出した。これら磁場強度と磁場勾配のデータから、式(6)から式(9)を用いて各計算出力点上での磁気力が与えられる。更に、計算出力点で囲まれた各セルの中心点に、それら近傍4点上の磁気力を内挿する。ブロックの軌跡計算においては、上記セルのうちブロックが存在するセルを判別させ、そのセルの中心に与えた上述の磁気力を、ブロックに作用する磁気力として近似的に与えた。

図4に、磁石が配置されている左右の壁に吸引される様子を示すブロックの軌跡計算結果の一例を示す。

Fig.4 An example of motion of ferromagnetic flocs

3・2 解析条件 本解析では、無次元磁石配置間隔の逆数（パラメータ F ）を一定として磁石個数 N を変えた場合と、磁石個数 N を一定として磁石配置間隔 L_2 を変えることによりパラメータ F を変えた場合について計算を行い、磁石個数 N とパラメータ F が分離性能に与える影響を解析した。表1から表4に、磁石個数 N とパラメータ F についての検討した計算条件を示す。また、パラメータ F は式(10)で定義する。

Table 1 Calculation conditions with filling rate of magnets constant, and magnets aligned on both sides of flow channel

No.	N	U (m/s)	D_p (mm)	γ (-)	F (-)
1	1 - 6	0.2	0.1	0.0016	0.26
2	1 - 6	0.2	0.2	0.0016	0.26
3	1 - 6	0.2	0.4	0.0016	0.26
4	1 - 6	0.2	0.2	0.0032	0.26
5	1 - 6	0.2	0.2	0.016	0.26

Table 2 Calculation conditions with number of magnets constant, and magnets aligned on both sides of flow channel

No.	N	U (m/s)	D_p (mm)	γ (-)	F (-)
1	3	0.2	0.1	0.0016	0.26 - 1.0
2	6	0.2	0.1	0.0016	0.26 - 1.0
3	3	0.2	0.2	0.0016	0.13 - 1.0
4	6	0.2	0.2	0.0016	0.26 - 1.0

Table 3 Calculation conditions with filling rate of magnets constant, and magnets aligned on one side of flow channel

No.	N	U (m/s)	γ (-)	F (-)
1	3 - 6	0.2	0.0016	0.26
2	1 - 6	0.2	0.0032	0.26

Table 4 Calculation conditions with number of magnets constant, and magnets aligned on one side of flow channel

No.	N	U (m/s)	D_p (mm)	γ (-)	F (-)
1	3	0.2	0.2	0.0009	0.13 - 1.0
2	6	0.2	0.2	0.0009	0.26 - 1.00

$$F \equiv \frac{N \cdot a}{N \cdot a + N \cdot L_2} = \frac{a}{a + L_2} = \frac{a}{L_1} \quad (10)$$

3・3 解析方法の検証 本解析方法を検証するため、3.1 節に述べた計算条件と同型の磁石及び図 3 (a) に示した片側に磁石を配置した同型流路による実験を行い計算結果との比較を行った。本実験では、磁石数が 13 個から 17 個の場合について、フロック残存率の計測を行った。また、原水固形浮遊物としてカオリン粒子を用い、原水中の固形浮遊物濃度を 50mg/L で調整した。フロックを生成する添加剤については、四三酸化鉄添加濃度は 60mg/L、凝集剤（ポリ塩化アルミニウム）の添加濃度は 10mg/L とした。フロックの残存率は、分離部入口と出口の固形浮遊物濃度の比で与える評価方法を用いた⁽⁸⁾⁽⁹⁾。本実験では平均流速を 0.1m/s で与えたことから、平均流速が 0.1m/s の条件での計算を行った。表 5 に、計算条件を示す。後述する通り、実験条件で与えた磁石数についての直接的な計算は行わず、残存率は 4 章で示すモデルで予測した。

Table 5 Calculation conditions with filling rate of magnets constant, and magnets aligned on one side of flow channel under the condition of fluid velocity of 0.1m/s

N	U (m/s)	D_p (mm)	γ (-)	F (-)
1 - 6	0.1	0.2	0.0032	0.26

4. 解析結果と影響評価

4・1 解析結果 表 1 と表 2 に示した、流路の両側に磁石を配置した条件についての計算結果を述べる。図 5 に、表 1 中の No. 1 から No.3 の条件に対応する、異なる粒子径について磁石個数と除去率の関係を示す。また、図 6 に、表 1 中の No.2, No.4, 及び No.5 の条件に対応する、フロック中の磁性粒子含有率が異なる場合について、磁石個数と除去率の関係を示す。

これらの結果のうち特に図 5 の結果との比較で、図 7 にフロック径が 0.1mm と 0.2mm の場合について、磁石個数を 3 個と 6 個の一定値としてパラメータ F を変えた場合の除去率を示す。これらの計算結果は、表 2 の条件に対応する。磁石個数とパラメータ F が増加すると除去率が上がるが、その傾向についてはパラメータ F よりも磁石個数の影響が強く表れている。これらの影響の違いから、磁石の個数により決まる分離部空間の長さ、及びそれにより定められる分離部空間におけるフロックの滞留時間が、除去率を殆ど支配していると考えられる。そこで次節では、磁石の個数とフロックの残存率について考察する。

次に、磁石が片側に配置した場合について、表 3 と表 4 に示した条件についての解析結果を述べる。この磁石を片側に配置した場合は、異なる流路幅 w の 3 条件 (12.5mm, 25mm, 37.5mm) について検討した。図 8 に、表 3 の条件に対応する、これらの異なる流路幅の 3 条件について、磁石個数と除去率の関係を示す。これはフロック中の磁性粒子体積含有率が 0.0016 と 0.0032 の場合の計算結果である。また、図 9 に、表 4 の条件に対応する、同じくこれら異なる流路幅の 3 条件について、磁石個数を 3 個と 6 個の一定値としてパ

ラメータ F を変えた場合の除去率を示す。磁石を両側に配置した場合と同様に、磁石個数とパラメータ F が増加すると除去率が上がるが、その傾向については磁石パラメータ F よりも磁石個数の影響が強く表れている。磁石を両側と片側に配置したいずれの場合も、パラメータ F を 0.1 から 1.0 まで上げてても除去率は 0.1 程度しか増加していない。

Fig. 5 Relationship between number of magnets and removal rate of magnetic flocs for different floc sizes, with magnets aligned on both sides of flow channel

Fig. 6 Relationship between number of magnets and removal rate of magnetic flocs for different contents of ferromagnetic particles in the floc, with magnets aligned on both sides of flow channel

Fig. 7 Relationship between magnet filling rate and removal rate of magnetic flocs, with magnets aligned on both sides of flow channel

Fig.8 Relationship between number of magnets and removal rate of magnetic flocs, with magnets aligned on one side of flow channel

Fig.9 Relationship between magnet filling rate and removal rate of magnetic flocs, with magnets aligned on one side of flow channel

4・2 影響評価及び考察 前節では、磁気分離除去率がパラメータ F より磁石個数に著しく影響されることを確認した。そこで、磁石個数による磁気分離除去率の定式化を検討する。図 10 に示すように、磁石設置部を一つの多段反応器とみなし、各区域の物質収支を考える。一区域の長さは、パラメータ F の定義の際に用いた磁石中心間隔 L_i で与える。このとき、各区域でのフロックの除去消滅効果を 1 次反応で近似されると仮定し式(11)でモデル化する。ここに Q は通過流量、 Vol は各区域の容積、 k_R は消滅定数、そして C_i は各区域の濃度を表す。

Fig.10 Schematic figure of multistage reactor model

$$Q \cdot C_i - Q \cdot C_{i+1} = k_R \cdot Vol \cdot C_i \quad (11)$$

$$\tau = \frac{Vol}{Q} \quad (12)$$

$$\frac{C_{i+1}}{C_i} = \frac{1}{1 + k_R \cdot \tau} \quad (13)$$

$$C_N = C_0 \cdot \frac{1}{[1 + k_R \cdot \tau]^N} \quad (14)$$

$$R_N \equiv 1 - \frac{C_N}{C_0} = 1 - \frac{1}{[1 + k_R \cdot \tau]^N} \quad (15)$$

$$\ln(1 - R_N) = -N \cdot \ln(1 + k_R \cdot \tau) \quad (16)$$

Fig.11 Relationship between number of magnets and logarithm of residual rate of flocs for different floc sizes, with magnets aligned on both sides of flow channel

Fig.12 Relationship between number of magnets and logarithm of residual rate of flocs for different contents of ferromagnetic particles in the floc, with magnets aligned on both sides of flow channel

Fig.13 Relationship between number of magnets and logarithm of residual rate of flocs for different channel widths, with magnets aligned on one side of flow channel

ここで、磁石が1個の場合は一区域の長さ L_1 とパラメータ F が定義されないことに注意して、式(11)のモデルは磁石が2個以上存在する場合に適用する。また、ブロックが1つの区域を通過する時間を式(12)で表すと、式(11)から式(13)が導かれ、 N 個目の区域を出た後の濃度 C_N について式(14)が得られる。これにより、除去率は式(15)のように表される。更に式(15)を式(16)のように変形すると、1から除去率を差し引いた値の対数、つまりブロック残存率の対数は磁石個数に比例する関係を得る。そこで、前節で得た結果から、磁石個数とブロック残存率の対数の関係を、磁石が流路の両側に配置される場合について図11と図12に示し、流路の片側に配置される場合について図13に示す。いずれも、パラメータ F が定義可能な磁石個数が2個以上配置される計算結果についてのみ示している。図11と図12には、それぞれブロック径、及び磁性粒子体積含有率の条件が異なる場合についての結果を示した。図13は、異なる3つの流路幅の条件について、磁性粒子体積含有率が0.0016と0.0032の場合について示した。ブロック残存率の対数は、式(16)に示されるように切片がゼロで、磁石個数 N に比例する直線で表される。そのため、図11から図13に示した近似直線は、切片がゼロの直線である。これら図12から図13においては、除去率が1となる場合は残存率の対数を与えることができないため除外している。流路の両側に磁石配置した場合で、磁性粒子体積含有率が0.016の条件(表1のNo.5の条件、図6参照)については、磁石個数が2個以上の条件でプロットできる点が1点しかない。そのため、この条件についてのプロットは図11に示していない。図11から図13に示したいずれの結果についても、ブロック残存率の対数が磁石個数に対し、近似的であるが比例する傾向が認められる。この比例関係は、式(11)のモデルが示すように、一つの磁石領域における除去率が、その上流領域の除去率に殆ど影響されるものではなく、1つの磁石のもつ除去率と磁石個数によって全体の除去率が決まることを示すものと考えられる。

4.3 解析方法の検証結果 本節では、3.3節に述べた実験と計算結果の比較検証について示す。図14に、表5に示した条件について、磁石数とブロック残存率の対数の関係を示す。また、図14には表1のNo.4の条件である平均流速が0.2m/sの場合についても示した。前節で示した結果と同様に、流速が異なるこれら2つの条件について、いずれも磁石数 N に比例する直線で近似される。

図14に示した直線の傾きと式(16)を用いて求めた消滅定数 k_R と通過時間 τ の積 $k_R\tau$ は、平均流速が0.1m/sの場合で0.39、平均流速が0.2m/sの場合で0.21であった。図15に、平均流速が0.1m/sの場合の $k_R\tau$ の値を用いて求めた磁石数 N とブロックの残存率の計算による予測結果と実験結果を示す。磁石数 N の増加に従い、実験結果は計算結果と同様に減少する傾向を示しており、概ね一致することが示されている。本比較

結果から、本解析方法を用いれば、定性的ではあるがある程度の予測ができる可能性が示された。

Fig.14 Relationship between number of magnets and logarithm of residual rate of flocs for different fluid velocity conditions, with magnets aligned on one side of flow channel

Fig.15 Comparison of calculation and experimental results on number of magnets and residual rate of flocs with magnets aligned on one side of flow channel

5. 結 言

磁場と流れ場の中に存在する磁性粒子を内包するブロック挙動を計算する手法を用いて二次元的な数値解析を行い、磁石配置に関して以下の結論を得た。

- (1) 磁気分離によるブロックの除去率は、無次元磁石配置間隔の逆数(パラメータ F)より磁石個数に大きく影響される。具体的には、磁石個数を6倍にすることで除去率は0.2から0.6程度増加するのに対し、無次元磁石配置間隔の逆数を0.1から1.0増加させた場合では、除去率は0.1程度しか増加しないことが確認された。
- (2) 磁石個数の磁気分離除去性能に対する影響について、ブロック残存率の対数と磁石個数が近似的に比例する傾向が認められた。
- (3) 磁気分離除去性能に関する実験結果と計算結果を比較し、定性的ではあるがブロック残存率の計算結果と実験結果が概ね一致する結果を得た。

文 献

- (1) The Institute of Electrical Engineers Japan, Technical Report of Current State and Trend on High

- Gradient Magnetic Separation Antipollution Electrical Engineering Measures (in Japanese), Vol.114 (1981)
- (2) Iannicelli J., New Developments in Magnetic Separation, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.MAG-12, No.5, (1976), 436-443
 - (3) Kaneko, High Gradient Magnetic Separation, Application to Water Treatment Containing Large amounts of Algae (Review), *Journal of Water Reuse Promotion Center* (in Japanese), Vol.8, No.3, (1982), 49-53
 - (4) Isogami,H., Saho,H., Tkagi,T., Morita,M., Sewage Treatment Performance of a Continuous Superconducting-Magnetic Separator, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers , Series B* (in Japanese), *Series B* , Vol.66, No.648 (2000), pp.274-279.
 - (5) Tanbo, Watanabe, Study on Density of Aluminum Floc, *Journal of Japan Water Works Association* (in Japanese), Vol.397, (1967), pp.2-10
 - (6) Morita,M., Saho,N., Isogami,H., Takagi,T., A Model for Analysing the Behaviour of a Magnetic Floc, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, , Series B* (in Japanese), Vol.67, No.653 (2001), pp.82-87.
 - (7) Chikazumi, Magnetic Substance Handbook (in Japanese), (1975), p.612, Asakura
 - (8) Morita,M., Saho,N., Isogami,H., Development of a High-Speed Purification System by Using a Superconducting Magnetic Separation Method, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, , Series B* (in Japanese), Vol.70, No.696, (2004), pp.2071-2076.
 - (9) Morita,M., Saho,N., Isogami,H., Study on a Water and Sludge Treatment Method Using Superconducting Magnetic Separation and Hydrothermal Decomposition (in Japanese), Vol.71, No.706 (2005), pp.1611-1616.