

磁気分離装置を用いたゲル粒子の分離

栗延 俊太郎* 尾崎 博明**

Separation of Gel Particles using by Magnetic Separator

Shuntaro KURINOBU* Hiroaki OZAKI**

ABSTRACT

The performance of a magnetic separator consisting of two flow channels without a matrix was studied. Gel particles containing magnetite particles are effective for removing two contaminants in the same reactor. About 90 % of gel particles containing 4.0% magnetite particles were separated from those without magnetite particles. In addition, the gel particles containing nitrobacteria and 2.0% magnetite particles and gel particles containing phosphate adsorbent particles were used to remove ammonium-nitrogen and phosphate ions. Both the concentration of ammonium-nitrogen and phosphate ions decreased with increasing time in a same reactor. The magnetic field in the magnetic separator was analyzed numerically.

キーワード：磁気分離装置, ゲル粒子, 水処理, 包括固定化

Keywords: magnetic separator, gel particle, water treatment, immobilization support

1. まえがき

水処理には多くの方法があり, 微生物を使用する方法や吸着など多くの方法が用いられている。微生物を用いる方法は広く行われており, 下水道排水の処理には活性汚泥法が基本的な方法として使用されている。有機塩素化合物のような難分解で有害な種々の物質を, 排水中から分解除去することは非常に重要である。しかし難分解性物質を分解する特殊な微生物は活性汚泥中にはほとんど存在しない。特殊な微生物は固定化し使用する方法が有効であり, 高分子物質で包括する包括固定化法などが用いられる^[1]。

包括固定化法は, 微生物を処理槽内に高濃度に保持できると共に, ゲル粒子に含有する微生物を種々の他の微生物系から分離しうる事が最大の利点である。ポリエチレングリコールで固定化された硝化菌を含むゲル粒子を活性汚泥槽中に投入して処理を速める方式は, いくつかの処理場で実用化されている^[2]。

異なった微生物をそれぞれ固定化し, 汚水処理後にそれぞれ異なったのゲル粒子ごとに回収・再利用できれば, 効率的な水処理システムを構成することができ

る。このようなシステムを構築するためには, 磁性粒子を含んだゲル担体(以下ゲル粒子)を使用すると効率が良いと思われる^[3,4]。

さらに, 特殊な環境汚染物質を除去するためには, 汚染物質の吸着を用いた処理も工場などでは行われており, 上述の微生物を含んだゲル粒子の代わりに担磁した特殊な吸着剤を用いることもできる。特性の異なる吸着剤を入れた場合や, 吸着剤と微生物を含む包括固定化物を用いた場合には, 吸着剤を含むゲル粒子が環境汚染物質を吸着して, その性能が低下した場合に, 吸着剤を含むゲル粒子を担磁させることにより吸着能力が低下したゲル粒子のみ分離して入れ替えることができる利点がある。

このシステムを用いると, 異なる微生物を含む磁化の違うゲル粒子や非磁性のゲル粒子を使用することにより, 同じ処理槽で種々の環境汚染物質を同時に分解することも可能である。この方法は, 磁気分離装置の性能がシステム全体の性能に大きな影響を与えるので, 今回, 連続に磁気分離できる装置を作製し, ゲル粒子の回収・分離に関する性能を調べた。さらに, 応用実験としてリンと窒素の処理実験を行った。

*電子・電気工学科

**大阪産業大学

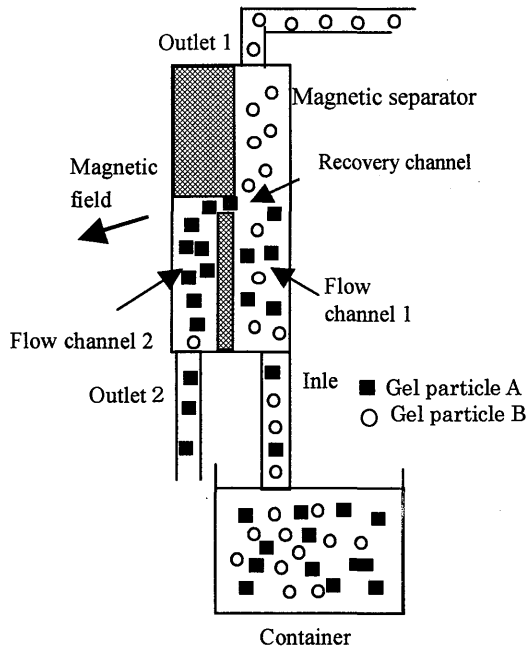


図1 磁気分離装置
Fig.1 Magnetic separator.

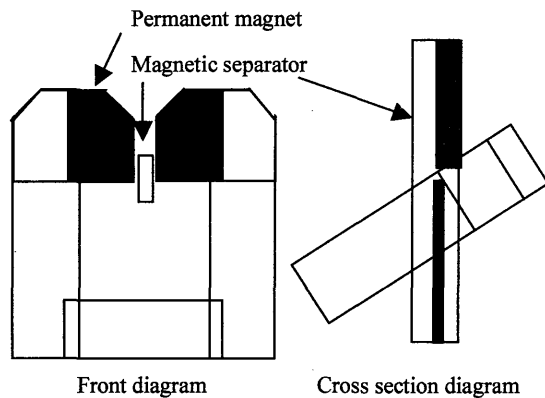


図2 磁気分離装置の配置
Fig.2 Arrangement of a magnetic separator.

2. 実験方法

2・1 ゲル粒子の分離

マグネタイトを含むゲル粒子と含まない非磁性ゲル粒子の連続磁気分離について実験方法を説明する。ゲル粒子として日立プラント建設(株)より提供されたポリエチレングリコールゲルを使用した。マグネタイトを入れたポリエチレングリコールゲルとマグネタイトを含まないポリエチレングリコールゲルを実験に用いた。それぞれのポリエチレングリコールゲルを細かく粉砕し、直径を500-800 μm に揃えた粒子を作製した。ゲル中のマグネタイト粒子の直径は約0.03 μm である。ゲル粒子の分離実験には4.0%(W/W)

表1 処理液の成分

Table 1 Chemical composition of treated water.

NaHCO_3	1170 mg
NaCl	51 mg
KCl	24 mg
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	24 mg
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	84 mg
NH_4Cl	optimum dose
Na_2HPO_4	optimum dose

のマグネタイトを含有するゲル粒子B(以下ゲル粒子B)とマグネタイトを含有しない非磁性ゲル粒子(以下ゲル粒子A)を使用した。ゲル粒子に微生物は入れてない。

磁気分離装置は図1に示す構造である。実験では図2に示すように永久磁石のギャップ間に磁気分離装置を設置した。左図は磁石を正面から見た図であり、右図は永久磁石のギャップ間の断面と磁気分離装置の配置の関係が示してある。磁極間の磁界勾配により、回収口の方向に大きな磁気力が生じるように設置した。磁気分離装置の磁界分布については後述する。

実験ではゲル粒子Aとゲル粒子Bを液体に対してそれぞれ0.5%含んだ懸濁液を作成し実験に用いた。液体中でのゲル粒子Aとゲル粒子Bの濃度は同じである。ゲル粒子を含んだ液体を磁気分離装置の入口に流入した。入口から流入したゲル粒子Bは、磁気力の強い方向に回収口を通して移動し流路2に流入する。流路2に堆積したゲル粒子Bは出口2より一定の流速でポンプにより排出され回収される。出口1にポンプが取り付けられており、マグネタイトの入っていないゲル粒子Aの大部分は、磁界によって回収口に引き寄せられることがないため出口1より排出される。

本研究で用いた磁気分離装置はマトリクスが入ってなく、また連続的に分離ができること、さらに後述するようにゲル粒子Bが出口2から排出される際に、出口2の液体中におけるゲル粒子Bの濃度が、入口の濃度に比較して高くなっているなどの特徴がある。

出口1より流出するゲル粒子A、または出口2より流出するゲル粒子Bの数の全ゲル粒子数(ゲル粒子Aとゲル粒子Bの合計数)に対する割合を一定量の液体に対してそれぞれ測定し、回収および分離に対する特性を調べた。磁気分離装置の入口から流入される懸濁液の流速を変えて実験を行った。また磁気分離装置内の磁界計算を行った。

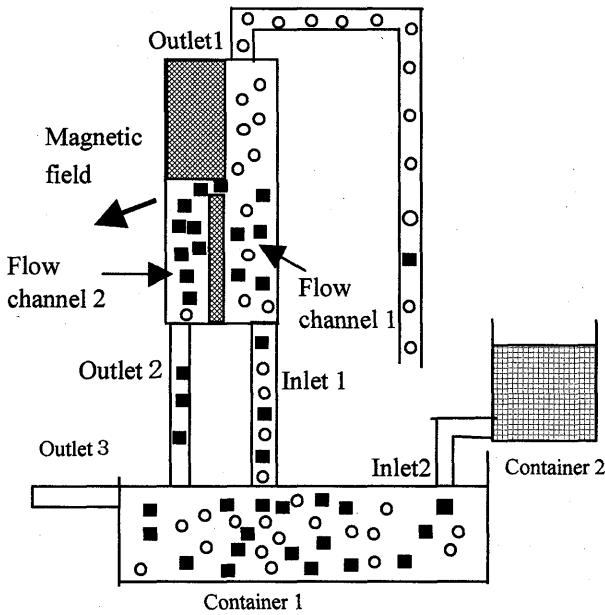


図3 アンモニア性窒素とリン酸イオンの処理の実験装置

Fig.3 An experimental apparatus for treatment of ammonium-nitrogen and phosphate ions.

2・2 窒素とリンの処理

上記の実験でゲル粒子を分離する実験を作製した磁気分離装置を用いて行った。次に、応用実験としてリン酸イオンとアンモニア性窒素の処理実験を、同じ構造の磁気分離装置を用いて行った。処理の対象となる液体はアンモニア性窒素とリン酸イオンを含んでいる処理液であり、硝化菌を含むゲル粒子の培養液を基本として作られた。1.0 lの純水に表1の薬品を入れ、処理液を作成した。

使用した試料の作成法を説明する。硝化菌が固定化され、2.0%のマグネタイト粒子を含む試料をゲル粒子Cとする。次に、リン酸塩吸着剤入りゲル粒子Dをアルギン酸ゲルを用いて作製した。アルギン酸ナトリウムを水に対して3.0%、リン酸塩吸着剤(市販品)を水に対して30%混合する。混合した試料をトレーに移し薄く伸ばして、引き続き塩化カルシウムを含んだ水溶液中に浸しておく。固まったら500-800 μ mの大きさに粉砕する。これをゲル粒子Dとする。

図3のような構成で、リン酸イオンとアンモニア性窒素の除去実験を行った。処理槽(容器1)内の処理液は1 lであり、流量200ml/hで容器2から処理液が流入され、同じ流量で処理液が出口3から流出するようになっている。表1の溶液に対して磁性ゲル粒子Cが5.0%、磁性ゲル粒子Dが3.0%になるように処理液に混ぜ、容器1に入れる。実験装置の構成は前述の実験と同じであり、処理槽はエアレーションされている。

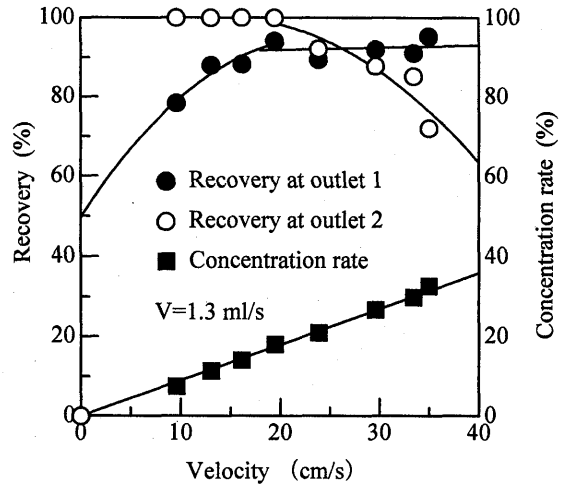


図4 回収率と濃縮率の流速に対する関係 (V=1.3 ml/s)

Fig.4 Recovery and concentration rate as a function of velocity (V=1.3 ml/s).

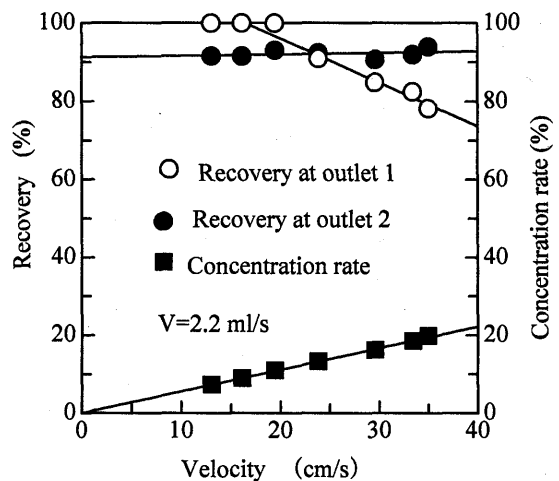


図5 回収率と濃縮率の流速に対する関係 (V=2.2 ml/s)

Fig.5 Recovery and concentration rate as a function of velocity (V=2.2 ml/s).

3. 実験結果

3・1 ゲル粒子の分離

液体中のゲル粒子濃度を変えた場合の結果を図4と図5に示す。実験結果では出口1で排出される液体中に含まれるゲル粒子Aとゲル粒子Bの合計である全ゲル粒子中のゲル粒子Aの割合と、出口2で排出された液体中に含まれる全ゲル粒子中のゲル粒子Bの割合からそれぞれの回収率を求めた。また、入口から流入する液体中のゲル粒子Bの濃度に対する出口2から流出するゲル粒子Bの濃度の割合を濃縮率とす

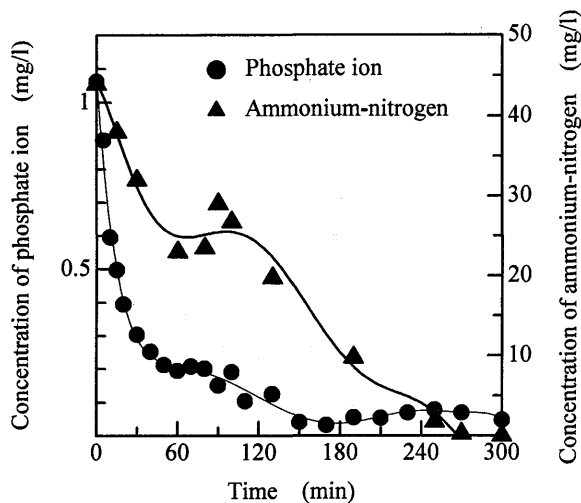
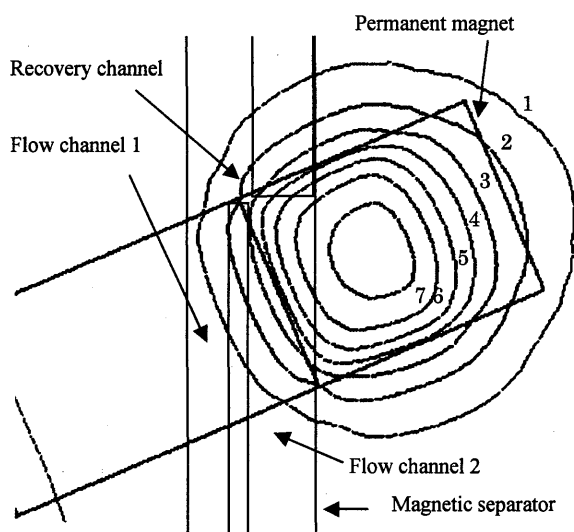


図6 リン酸イオン濃度とアンモニア性窒素濃度の時間変化

Fig.6 Concentration of Phosphate ion and ammonium-nitrogen as a function of time.



1: 2×10^5 A/m, 2: 3×10^5 A/m, 3: 4×10^5 A/m, 4: 5×10^5 A/m, 5: 6×10^5 A/m, 6: 7×10^5 A/m, 7: 8×10^5 A/m

図7 磁気分離装置周りの磁界

Fig.7 Magnetic field around a magnetic separator.

る。すなわち、分離された後のゲル粒子Bが分離される前の磁性ゲル粒子Bの何倍になっているかを示すのが濃縮率である。

図4は出口2から流出する流量が1.3cm/sの場合で、図5は出口2から流出する流量が2.2cm/sの場合である。磁気分離装置の構造上の特性として、流路1の流速の増加に伴い、回収口に行かずに入口1から出口1に移動するゲル粒子Bの割合は増加するため、流路

1の液体中に懸濁しているゲル粒子Aも回収口を通して出口2から必ず排出される。出口2の回収率が図4と図5のような特性を示すのは、磁気分離装置内でのゲル粒子の観察から、下記のような現象が起きているためと考えられる。

回収口に達するゲル粒子Bの濃度が低い場合、すなわち非常に低い流速では回収口の部分からゲル粒子Aとゲル粒子Bは共に流路1から回収口を通して流路2に引き込まれる。しかし、回収口に流入するゲル粒子Bの濃度が高い場合、すなわち流路1の懸濁液の流速が速い場合や出口2の流量が大きい場合には、回収口にゲル粒子Bが堆積し始め、回収口がゲル粒子で詰まった状態になることが観察された。

図4で出口2におけるゲル粒子Bの回収率が低流速で流速の増加に伴い増加しているのは、流速の増加につれて回収口がゲル粒子Bで詰まるようになり、ゲル粒子Bが回収口に入りにくくなるので、出口2のゲル粒子Bの回収率は流速が速くなるにつれて増加して行く。ほぼ詰まった状態になるとそれ以上流速が速くなくても回収率は変化しない。図5のように出口2の流量が大きい場合には、実験結果で示されるように出口2におけるゲル粒子Aの回収率は一定であり回収口はほぼ詰まった状態にあると思われる。

実用的には出口1においてはゲル粒子Bの90%以上の回収率が、また出口2においてもゲル粒子Aの90%以上の回収率が必要である。実験結果から、出口2の流量Vが1.3ml/sの場合は、流路1の流速がほぼ24cm/sの場合のみその条件を満たすので、実用的には適当ではない。出口2の流量Vが2.2ml/sの場合は、流路1の流速が10cm/sから22cm/sの場合は出口1と出口2の回収率は90%以上ある。従って、この条件で磁気分離装置を使用するのが適当と思われる。出口2の流量Vが2.2ml/sの場合、濃縮率は流速と共に増加し、実用的な範囲では最大14倍である。

回収率は流速を変えても条件を満たしており、本実験では出口2からの流量が2.2ml/sで、出口1の流速が22cm/s以下で使用するのが適当と思われる。

3・2 窒素とリンの処理の実験結果

図6に連続処理の結果を示す。処理槽に入れた処理液のアンモニア性窒素とリン酸イオンの濃度の時間変化を示す。実験開始後、アンモニア性窒素とリン酸イオンの濃度は時間と共に減少した。約80分でリン酸イオン濃度が減少しなくなり、ゲル粒子D中のリン酸塩吸着剤の吸着効果がなくなったと考えられたので、排出口2から流出する磁性ゲル粒子Dを網により除去し、前と同量の新しいゲル粒子Dを処理槽に加えた。その後、リン酸イオン濃度は次第に低下した。一方、アンモニア性窒素は、時間と共に次第に低下している。

しかし、ゲル粒子Dを入れ替えた場合に、アンモニア性窒素濃度の低下の割合が変化したが、これは網を入れる過程で、ゲル粒子Dの処理効果が一時的に変化したためと思われる。その後、アンモニア性窒素濃度は時間と共にゼロまで低下した。

4. 磁界分布

実験に用いた磁気分離装置を永久磁石に設置した場合の磁気分離装置の流路1, 流路2, 回収口付近の磁界を計算した。磁界計算には市販の磁界計算ソフトを使用した。永久磁石の磁界解析から計算した計算結果を図7に示す。図7は図2の左側の断面図の回収口付近の図であり、磁石を横方向から見た中央部分の断面図を示す。同じ磁界強度の線が図に示してある。

磁石の永久磁石部分には住友金属のneo-max48が使用してある。計算結果はギャップに垂直な方向の磁界であり、ギャップ中央の磁界が示されている。なお計算結果は実測から求めた値と良く一致している。

磁気分離装置は図からわかるように回収口が永久磁石の端で、かつ磁界こう配が大きくなる箇所に設置されている。磁気分離装置の設置では流路2に入ったゲル粒子Bがポンプにより出口2から容易に排出されるためには、流路2における磁界が弱い方が良い。従って図のような位置に設置した。図から回収口から流路2に向かって斜め方向にゲル粒子Bが移動するように磁界が印加されていることがわかる。

本実験で使用している構造の磁気分離装置では、特に回収口の周りの磁界こう配が重要であり、その部分が強くて、それ以外の流路1および流路2の磁界が弱いことが重要であり、このような条件を満たすより最適な磁界分布が得られる磁石が必要となる。

5. 考察

微生物や吸着剤が入っていないゲル粒子を用いて、磁気分離装置の性能を調べるために2種類のゲル粒子の分離の実験を行った。回収口がゲル粒子Bでほぼ詰まった状態になると、ゲル粒子Aが回収口に入りにくくなるので、排水口2におけるゲル粒子Bの回収率が增加すると考えられる。従って、回収口の大きさは特性に大きく影響すると考えられるので、今後は回収口の大きさを調整できる構造の磁気分離装置を作製し実験を行う予定である。

引き続き窒素とリンを連続処理する実験を行った。アンモニア性窒素とリン酸イオン濃度は連続的に減少しており、特に吸着剤を含んだゲル粒子Dの吸着性能が低下した際に、ゲル粒子Dのみ選択的に入れ替えたが、この方法はゲル粒子に限ったことではなく、担磁できる粒子であれば広く応用できると思われる。

6. むすび

本研究では、2種類の環境汚染物質を同時に同じ処理槽で処理する方法を提案し、新しい型の磁気分離装置を作製し実験を行った。得られた結果は、次のようになる。

- (1) 磁性粒子を含むゲル粒子と含まないゲル粒子を連続的に分離するため、マトリクスのない磁気分離装置を作製した。この装置は、2種類のゲル粒子を90%以上分離することができ、十分な性能を有することを示した。さらにこの装置は、従来の装置に比較して逆洗の必要がなく、磁性粒子を含んだゲル粒子を濃縮することができることを示した。
- (2) 応用例として、リン吸着剤を含むゲル粒子と硝化菌と磁性粒子を含むゲル粒子を用いてリン酸イオンとアンモニア性窒素の除去実験を行った。同じ型の磁気分離装置を用いリン吸着剤の吸着性能が低下した場合、リン吸着剤を含むゲル粒子のみを磁気分離を用いて新しいゲル粒子と交換することで連続処理が可能であることを示した。
- (3) また、磁気分離装置内の磁界を計算することにより、今後作製する磁気分離装置の磁界分布に関し有用な知見を得た。

本研究で使用した試料を提供して頂きました日立プラント建設株式会社の方野立夫氏には深謝します。

参考文献

- [1] 角野立夫：微生物固定化法による水処理, エヌ・ティ・エス出版, pp.109-130 (2000).
- [2] N. Hashimoto and T. Sumino: Wastewater Treatment Using Activated Sludge Entrapped in Polyethylene Glycol Prepolymer, *J. Ferment. Technol.*, **86**, pp.424-426 (1998).
- [3] H. Ozaki, Z. Liu, and Y. Terashima: Utilization of microorganisms immobilized with magnetic particles for sewage and wastewater treatment, *Wat.Sci.Tech.*, **23**, pp.1125-1136 (1991).
- [4] 松井明洋, 栗延俊太郎, 尾崎博明, 渡辺恒雄, 角野立夫: ゲル粒子の連続磁気分離, 第3回磁気分離研究開発に関するワークショップ, ポスターセッション予稿集, pp. 60-62 (2002).