

環境共生型下水汚泥処理・利用システムの構築に関する研究

九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 平島 剛
(株) 荏原製作所 エンジニアリング事業本部 萩野 隆生
久留米市 下水道部 田川 博樹
福岡県農業総合試験場 土壌・環境部 山本 富三
福岡県保健環境研究所 環境科学部 永瀬 誠・黒川 陽一

1. はじめに

リン資源は地球規模での将来的枯渇が懸念されている資源の一つである。既に欧米では、リンを戦略物質に指定しリン鉱石の輸出を規制し、国を挙げてリン資源の回収とリサイクルに取り組みは始めている。一方我が国は、年間数十万 t に及ぶリン鉱石、及び食料や飼料等の形態での大量のリン資源を海外から輸入しているが、そのリンの多くは、動植物に取り込まれ、それを食品として人間が消費し、その排泄物は下水処理場において最終的に下水汚泥となる。リンを多量に含む下水汚泥はセメント原料化が困難であり、減量化処理後に廃棄物として埋立処分される。特に管理型処分場では埋立地が逼迫しており、廃棄物である汚泥のリサイクルは最も火急に対応すべき社会的課題の一つと言える。また、一部のリンは水環境汚染物質として河川や海に流出し、富栄養化の問題を引き起こす一因となっている。特に研究場所である有明海沿岸では、富栄養化対策として排出源の栄養塩総量規制の動きがあり、栄養塩排出抑制対策が急務とされている。また、下水処理場においては、リン酸マグネシウムアンモニウム (Magnesium Ammonium Phosphate, MAP) による配管・消化槽の閉塞や機器の摩耗、焼却・熔融時の飛灰のリン凝結トラブルを引き起こしている。また、コンポスト化においては汚泥中の重金属が、燃料化においてはリン、重金属などが問題になることからこれらの除去が望まれている。

従来までは下水処理場におけるリン除去法として、①生物学的脱リン法、②凝集沈殿法、③晶析脱リン法の 3 種類が一般的であった。①、②の方式は水処理系の水質を確保するためにリンを除去することを目的とする方式であり、除去したリンを汚泥中に固定させる方法である。唯一③のみは返流水のリンを MAP や HAP として回収することを目標としている。しかし、消化槽を有する下水処理場では汚泥中に微粒の MAP が自然に析出している。この MAP 粒子は、通常 $400\ \mu\text{m}$ 以下の微粒であり 0.5g/L 程度と低濃度で存在し、髪の毛や植物の種子等のきょう雑物や他の汚泥中微粒子とともに混在するため MAP 粒子の

みを選択的に回収することは困難と考えられてきた。(株)荏原製作所 萩野ら¹⁾及び九州大学 平島ら²⁾は、下水汚泥嫌気性消化処理施設からのリン回収の回分試験を行い、「振動ふるい、ハイドロサイクロン、MGS (Multi-Gravity Separator)」を用いた湿式選別プロセスにより、MAP 回収の可能性を示した。

本研究では、低コストで下水汚泥からリンを高品位のMAP とし連続回収するシステム及び回収したMAP 中の微量重金属量の評価、MAP の肥料化の可能性について検討を行った。

2. 試料及び実験方法

図1に、MAP 回収実験フローを示す。供給汚泥には、下水処理場A及び久留米市南部浄化センターにおける嫌気性消化汚泥を用いた。まず、消化汚泥を所定のふるい目の振動ふるいにかけて夾雑物を除去したのち、4インチハイドロサイクロンで濃縮し、必要な場合はその濃縮汚泥を2インチハイドロサイクロンで再濃縮した。濃縮後の汚泥はMGSにて薄流選別・洗浄を行い、MAPを回収した。以下、処理場Aの汚泥から回収したMGS産物をMAP-A、久留米市南部浄化センターの汚泥から回収したMAPをMAP-Bと表すことにする。MGS処理後、MAP-Aは乾式、MAP-Bは乾式または湿式で磁力選別を行った。乾式磁選機として対極型磁選機(日本磁力選鉱(株)製)を湿式磁選機としてNJ式-湿式高磁束試験機(日本磁力選鉱(株)製)を用いた。湿式磁選にはMGS産物スラリーを、乾式磁選にはMGS産物を約40[°C]で乾燥したものをを用いた。MAPには磁性が無いいため主に非磁着物試料として得られる。磁選の効果は、歩留り、MAP品位によって評価を行った。非磁着物試料のMAP品位は、硫酸溶解液中の PO_4^{3-} イオン濃度を吸光光度法により測定し、MAP量に換算して求めた。また、磁選試料中の鉱物の同定はX線回折(XRD)および顕微鏡観察により行った。

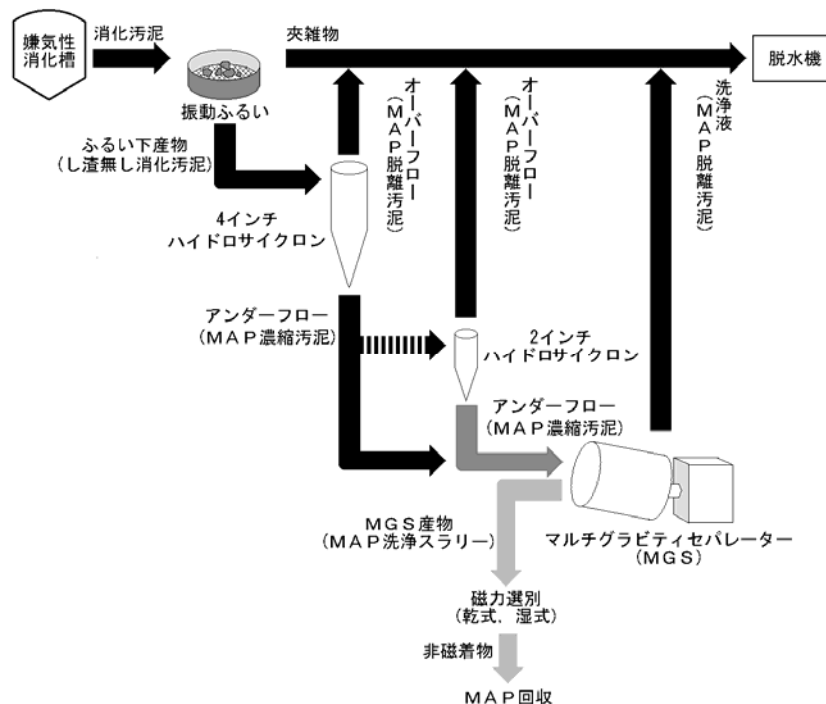


図1 MAP 回収実験フロー

3. 結果と考察

下水処理場 A において回分試験で行った単位装置の実験条件を表 1、液体サイクロンの供給汚泥中の MAP 量と回収率との関係を図 2 に示す。振動ふるいでは、サイクロンの MAP 分離性の阻害要因となる植物の種や髪の毛等の比較的大きな粒子を取り除いた。分離量は、固形物として 3.0%、MAP ベースで 0.7% であった。2 つの液体サイクロンの濃縮性能は、4 インチが VF 径 35mm、SC 径 10mm の場合に 44 倍濃縮、MAP 回収率 94.8%、2 インチは VF 径 14mm、SC 径 6.4mm の場合に 9.8 倍濃縮、MAP 回収率 99.1% であった。サイクロンの MAP 回収率は供給汚泥中の MAP 量が 2.0g/l 未満の場合は回収率が 95.0% 以下であったが、MAP 量が 2.0g/l 以上の場合は 98.0% 以上であった。

MGS のフィード流量に対する洗浄水量の比（以後、洗浄水量比）と MAP スラリー上澄水 SS との関係を図 3、MGS 洗浄水量比と MAP 回収率との関係を図 4 に示す。MGS を用いた選別及び洗浄工程では、液体サイクロンによって汚泥中 MAP 量が約 200g/l まで濃縮された汚泥を供給汚泥とした。MAP 回収率は、回転数が大きいほど、洗浄水量比が小さいほど、MAP 負荷量が高いほど良好であった。MGS の傾きによる回収性能の差は無かった。回転数 318rpm、傾き 4°、MAP 負荷量 200g/l、洗浄水量比 1.5 倍の条件において、MAP 回収率は 96.9% であった。

表 1 単位装置の実験条件

機器名	処理速度	実験条件
振動ふるい	4~6m ³ /h	φ 600mm、穴径：1.18mm
4 インチサイクロン	20~30m ³ /h	VF：35mm、SC：10~15mm
2 インチサイクロン	4~6m ³ /h	VF：14mm、SC：3.2~6.4mm
MGS	60~180L/h	280~318 r p m、傾き：2~4°

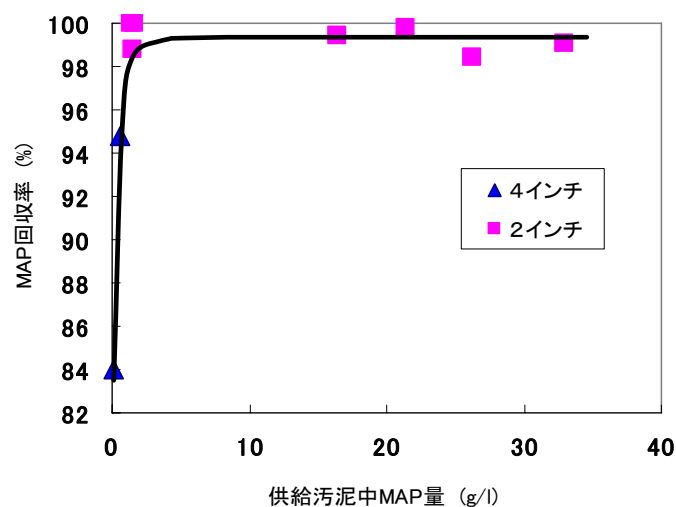


図 2 液体サイクロンの供給汚泥中の MAP 量と回収率との関係

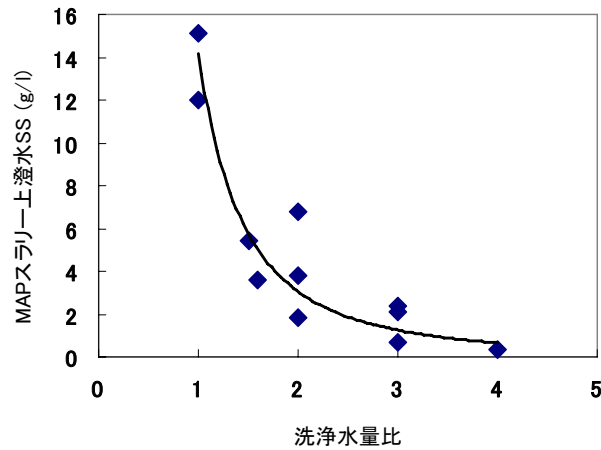


図3 洗浄水量比とMAPスラリー上澄水SSとの関係

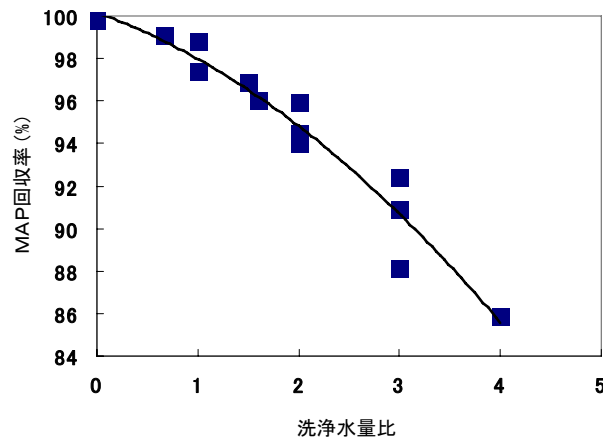


図4 MGS洗浄水量比とMAP回収率との関係

以上の単位装置の処理結果を重ねて、汚泥処理量 100m³/d、SS負荷量 2000kg/d、MAP負荷量 90kg/dの下水処理場において、本システムを採用した場合のMAP回収シミュレーション結果を図5に示す。原汚泥となる消化汚泥中のMAP量 90kg/dは、本システムによって最終的に81.4kg/dが回収でき、割合にして90.4%のMAPを回収することができる。一方、本システムにより排出される汚泥は、原汚泥に対してボリュームで99.8%、固形物として96.7%に相当する1934kg/dとなるが、MAPは回収済みなので9.6%のみが汚泥に残留するという結果となった。

回収したMAP-A及びMAP-Bの産物中には微量ではあるが重金属が含まれている。より高品質のMAPを回収することを目的として磁力選別法による重金属除去試験を行った²⁾。乾式磁選における非磁着物の歩留りを図6に示す。図から、磁束密度が大きいほど非磁着物試料は減少することが分かる。これは、大きな磁束密度になるほど磁性の弱い試料が磁着物として回収されるためである。湿式磁選の結果も同様な傾向を示した。磁選前試料(Feed)と湿式または乾式で選別した非磁着物試料のMAP品位を比較した結果、MAP品位は4から9%程度向上しており、明らかに磁選がMAP品位向上に有効であることが明らかになった。

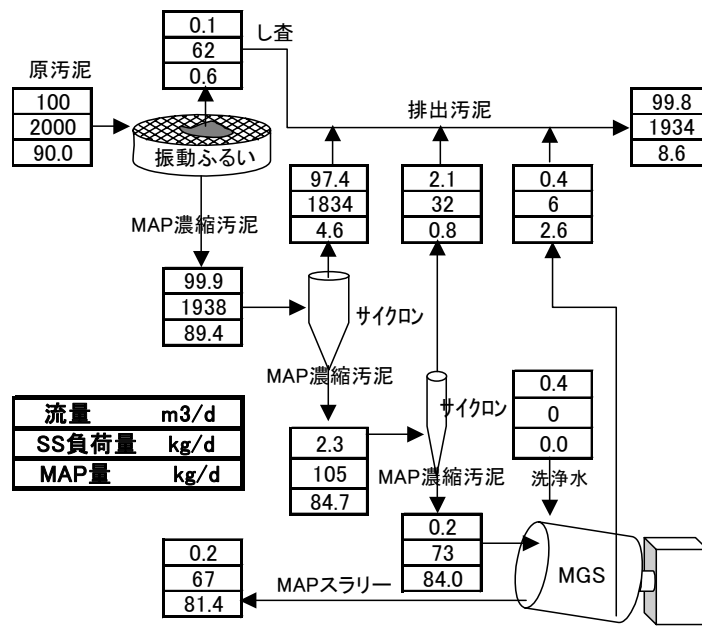


図5 MAP回収シミュレーション結果

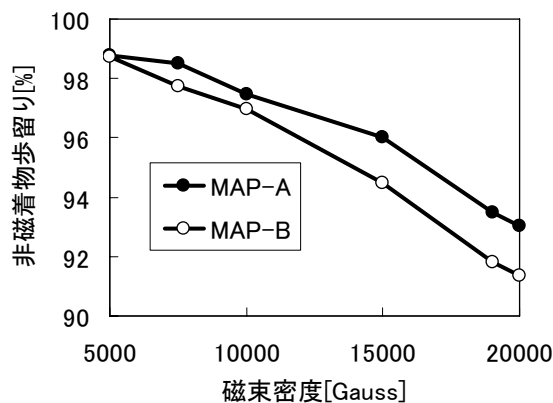


図6 乾式磁選の非磁着物歩留り

MAP-A の乾式磁選における Feed, 非磁着物試料, 磁着物試料の XRD 分析を行った結果、Feed 試料では、MAP(鉍物名 Struvite)のピークが顕著であり、MAP からアンモニアが抜けた組成をもつ Newberyite のほか、石英、斜長石のピークも確認できた。非磁着物試料では、Struvite と Newberyite 以外の顕著なピークは認められなかった。磁着物試料には磁性鉍物であるマグネタイトのほか、Struvite, 斜長石, 石英, 輝石のピークが認められた。マグネタイトに関しては、純粋な Fe_3O_4 のみが存在するのではなく、Mg や Ti, その他の微量重金属を取り込んでいるものと考えられ、非磁着産物中の重金属濃度は著しく低下した。

磁着物試料を偏光顕微鏡や SEM-EDX で観察すると、鉄で汚染された輝石や石英などが見られたが、もともと鉄が付着した輝石や石英などが雨水によって流入し、回収されたものなのか、下水処理プロセスのいずれかにおいて鉄沈殿物が生じ、表面に付着したものであ

るのかは判断できず、今後さらに検討を行う予定である。

以上の結果をもとに現在、(株)荏原製作所及び九州大学は共同研究を行っており、久留米市南部浄化センターの協力を得て同センターにおいて連続 MAP 回収システムの実証試験を行っている。

4. まとめ

「振動ふるい、湿式サイクロン、MGS(Multi-Gravity Separator)」を用いた湿式選別プロセスにより MAP 回収率 90%を達成した。回収した MAP 産物品位は、さらに磁力選別を行うことにより 4~9[%]程度向上するとともに MAP 中の重金属量を著しく低減できることがわかった。XRD 分析および顕微鏡観察結果から、非磁着物試料では Feed から MAP 以外の鉱物がかなり除去されていることが分かった。磁着物試料には、強い磁性を持つマグネタイトの他に、斜長石や石英、輝石などの非磁性鉱物も含まれていた。マグネタイトに関しては、純粋な Fe_3O_4 のみが存在するのではなく、Mg や Ti, その他の微量重金属を取り込んでいるものと考えられ、非磁着産物中の重金属濃度は著しく低下した。

得られた MAP 産物は、肥料取締法に基づく重金属などの規制値をクリアしており、遅効性の肥料として十分使用可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 萩野隆生、平島剛:資源・素材学会春季大会講演集(Ⅱ)素材編, pp141-142(2004)
- 2) 平島剛、巨瀬未愛、笹木圭子、萩野隆生:資源・素材学会春季大会講演集(Ⅱ)素材編, pp175-176(2005)