

## (47) 亜臨界水処理と MAP 法および UASB 法との 組合せによる余剰汚泥資源化プロセスの 最適化に関する検討

荒金 光弘<sup>1</sup>・今井 剛<sup>1\*</sup>・村上 定暲<sup>2</sup>・竹内 正美<sup>2</sup>

浮田 正夫<sup>1</sup>・関根 雅彦<sup>1</sup>・樋口 隆哉<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>2</sup> 宇部工業高等専門学校物質工学科 (〒755-8555 山口県宇部市常盤台 2-14-1)

\*E-mail: imai@yamaguchi-u.ac.jp

本研究グループは、亜臨界水処理、MAP 法および UASB 法を使って、下水汚泥を資源化させるプロセスの開発を行ってきた。しかし、本プロセスを用いて汚泥を高効率に資源化させるには、MAP 法と UASB 法とをどのようにプロセスに組み込むかを検討する必要がある。そこで本研究では、リン回収先行型とメタン回収先行型の 2 つのケースについて連続実験を行い、リンおよびメタン回収量に違いが生じるか検討した。連続実験の結果から、メタン回収先行型はリンを多く回収することができたが、両運転型のメタン回収量に有意差はなかった。このため、リン回収量が多かったメタン回収先行型を資源化プロセスに組み込むことで、汚泥が高効率に資源化できることがわかった。

**Key Words :** subcritical water process, MAP process, UASB process, resource recovery, excess sludge

### 1. はじめに

近年、ごみ処理を取り巻く状況は、ダイオキシン類削減問題、最終処分場の逼迫問題、その対策としての循環型社会への推進等、大きな転換期を迎えている<sup>1)</sup>。こうした中、廃棄物関連の研究動向も変化している。1990 年以降の 13 回の廃棄物学会研究発表会で報告された研究の内、資源化および再利用に分類されるものは循環型社会形成への流れを反映して増加の一途を辿っている<sup>2)</sup>。そこで、本研究グループは下水汚泥の資源化に注目した。それは、我が国の下水汚泥発生量が下水道の普及率の向上にともない年々増加しており、平成 14 年度には年間 210 万トン(乾重ベース)に達し<sup>3)</sup>、大きな社会問題となっているからである。さらに、下水汚泥は下水処理場に集中して大量に発生するため、比較的容易に有効利用できると期待されている<sup>4)</sup>。本研究グループでは、下水汚泥から有価資源として回収する対象物質にリンおよびメタンを選定した。これは、リンが枯渇資源であり、経済的に採取可能な良質のリン鉱石の埋蔵量は、世界規模で長くとも 40 年～50 年程度<sup>5)</sup>といわれているからである。さらに、リンは年間 40 万トンが生活・産業系排水から環境中へ流出しており<sup>6)</sup>、リンの回収・資源化の必要性が強まっている<sup>7)</sup>。一方、メタンは、燃焼することで二酸化炭素が発生する。しかしながら、生物系の循環サイクルに組み込むことができれば大気中

の二酸化炭素濃度の増加につながらないため、カーボンニュートラルが実現でき<sup>8)</sup>、化石燃料に由来する温室効果ガスの発生を抑制することができる。また、メタンは化石燃料の代価エネルギーとして注目されていることに加え、メタンを最大限に有効利用することにより、地域社会にエネルギーを供給するシステムも構築されつつある<sup>9)</sup>。

下水汚泥からリンおよびメタンを容易に回収するためには、下水汚泥の低分子化(これを可溶化と称する)工程を資源回収の前処理工程として組み込む必要がある。下水汚泥を可溶化させる方法の代表的な例としては、化学的処理法<sup>10)~12)</sup>、生物学的処理法<sup>13)</sup>、および物理的処理法<sup>14)~19)</sup>などがある<sup>20)</sup>。このように数多くある可溶化技術の中で、本研究グループは、汚泥を高効率に可溶化できる<sup>18)</sup>という理由から、亜臨界状態で可溶化する水熱処理法<sup>18)</sup>(これを亜臨界水処理と称する)を用いた汚泥の資源回収型処理プロセスを提案した(図-1 参照)。本プロセスは、亜臨界水処理によって汚泥からリンならびに有機物を溶出させ、溶出したリンならびに有機物を Magnesium Ammonium Phosphate (MAP) 法あるいは Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) 法を用いて、リンならびにメタン回収するものである。これまで、MAP 法および UASB 法を個別に用いて、可溶化汚泥からリンもしくはメタンをそれぞれ回収することができた<sup>21), 22)</sup>。しかしながら、本プロセスの最適化の

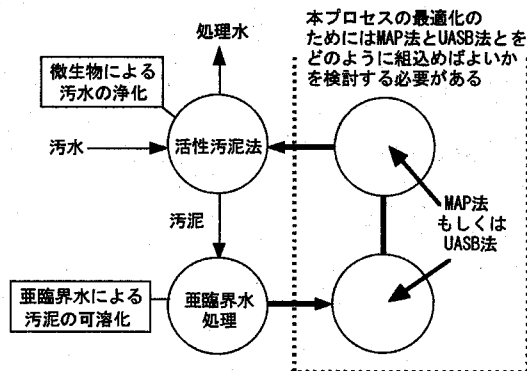


図-1 汚泥の資源回収型処理プロセスに関する概略図

ためには、MAP法とUASB法とをどのようにプロセスに組込むかを検討する必要がある。(図-1参照)。

そこで本研究は、可溶化汚泥からリンおよびメタンを多く回収できるプロセスの最適化について、リン回収先行型とメタン回収先行型の2つのケースについて実験的な検討を行った。具体的には、まず山口県宇部市内の下水処理施設で発生した下水汚泥のうち余剰汚泥(これを汚泥と称する)を対象に、同施設内に設置されているパイロットスケールの亜臨界水処理装置(これを実験装置と称する)を用いて可溶化した。次に可溶化された汚泥を、MAP法からUASB法を経るリン回収先行型とUASB法からMAP法を経るメタン回収先行型とで別個に連続運転を行った。これらの結果から、どちらの運転型が資源回収型処理プロセスとして最適であるかを検討した。

## 2. 実験方法および分析方法

### (1) 亜臨界水処理に関する実験方法(連続実験)

本研究で用いた装置は、山口県宇部市内の下水処理施設に設置されているパイロットスケール装置<sup>23)</sup>である。本装置は、異物除去装置、加熱器、反応器、冷却器、固液分離装置、圧力調整弁、補助冷却器および循環水冷却器によって構成されている。加熱器、反応器および冷却器は溶接して直列に接続した連続鋼管である(反応器部分の体積は約15Lである)。本装置には汚泥中の異物を除去するために、異物除去装置ならびに固液分離装置を導入した。

実験装置に投入される汚泥は、昇圧ポンプにより加熱器へ移送される。移送され加温された汚泥は反応器内で可溶化される(可溶化率は60%程度)。その後、可溶化された汚泥は、冷却器内で冷却される。実験装置から得られた未ろ過の汚泥を可溶化汚泥とした。これに対して、ボアサイズが $1\mu\text{m}$ でろ過したものを可溶化液とした。

実験装置における設定温度は $210^\circ\text{C}$ とした。また、反応圧力は $2.4\text{MPa}$ とした。本装置に汚泥を約 $30\text{L/hr}$ で投入した(反応器内滞留時間は約90分であり、これは昇温30分、反応時間30分および冷却30分の合計である)。

実験装置の稼働毎に得られた可溶化液に含まれていた $\text{COD}_\text{Cr}$ (これをCODと称する)、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ およびMg濃度の平均値を表-1に示す。なお、可溶化汚泥のpHは約6.35であり、SS濃度は約

表-1 亜臨界水処理装置から得られた可溶化液中の $\text{COD}_\text{Cr}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ およびMg濃度(平均値)

| $\text{COD}_\text{Cr}$      | 7000 (mg $\text{COD}_\text{Cr}/\text{L}$ ) |               |
|-----------------------------|--------------------------------------------|---------------|
| $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ | 200 (mg/L)                                 | 6.5 (mmol/L)  |
| $\text{NH}_4^+-\text{N}$    | 220 (mg/L)                                 | 15.7 (mmol/L) |
| Mg                          | 38.9 (mg/L)                                | 1.6 (mmol/L)  |

1200mg/Lであった(平均値)。

### (2) MAP法に関する実験方法(回分実験)

これまで本研究グループが行ったMAP法は、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ および $\text{NH}_4^+-\text{N}$ が存在している(特に $\text{NH}_4^+-\text{N}$ が過剰に存在)可溶化汚泥に、MAPを生成させるため、かつ液中のpHを9.0程度にするためにMg(OH)<sub>2</sub>を添加した<sup>18), 22)</sup>。しかしながら、生成したMAPに含まれているリンは精製品などに比べて少なかった<sup>22)</sup>。このため、本実験では、広く用いられているMAP法<sup>24), 25)</sup>を適用した。その方法とは、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ および $\text{NH}_4^+-\text{N}$ が存在している反応液に、MAPを生成させるために $\text{MgCl}_2$ を添加し、そして、液中のpHを9.0程度にするためにNaOHを添加するものである。

実験装置から得られた可溶化液には、平均値として $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ が約6.5mmol/L含有されていた(表-1参照)。そこで本実験では、可溶化液に含まれている $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ のモル数1に対して、 $\text{Mg}^{2+}$ のモル数が1.5となるように $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を添加した。すなわち、実験装置から得られた可溶化液には、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ が約6.5mmol/L含まれていると仮定して、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を約2000mg/L添加した(約9.8mmol/L)。またNaOHを用いて、可溶化汚泥のpHを9.5まで上昇させて、30分間反応させた。その後、HClを添加して可溶化汚泥のpHを7.0付近まで低下させた。サンプリングは $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の添加前と可溶化汚泥のpHを7.0付近に調整後に行った。

$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 除去率は式(1)で算出した。

$$\text{PO}_4^{3-}-\text{P除去率} = 100 \times (a - b) / a \cdots (1)$$

ここで、aは実験装置から得られた可溶化液中の $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 濃度(mg/L)、bは各回収工程後における可溶化液中の $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 濃度(mg/L)である。

### (3) UASB法に関する実験方法(連続実験)

UASB装置の概略を図-2に示す。これは反応槽と装置頂部にある三相分離器からなり、反応槽は直径100mm、高さ1.9m、反応容積は12.0Lである。槽内の温度は $35^\circ\text{C}$ に設定した。可溶化汚泥は、装置下部から定量ポンプにより槽内に投入され、処理水は装置上部から流出する。生成ガスは三相分離器の上部から脱硫装置を経て系外へ放出される。

本装置に別のプラントで採取したグラニュー汚泥を5Lずつ投入した。投入した後に、低濃度(1000~2000mgCOD/L)のグルコース基質で40日程度馴致した。

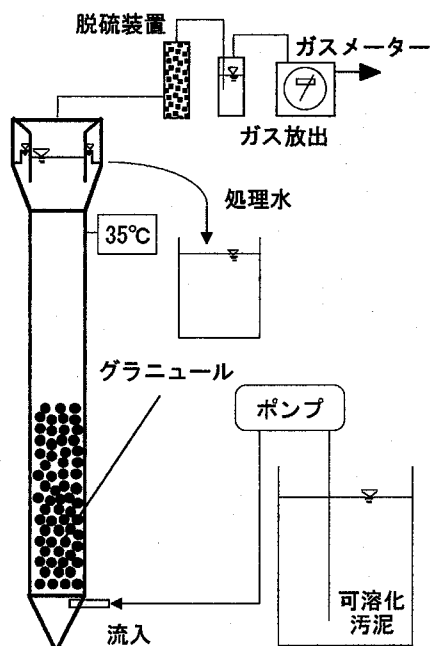


図-2 UASB装置概略図

COD除去率(%)は式(2)で算出した。

$$\text{COD除去率}(\%) = 100 \times (c - d) / c \cdots (2)$$

ここで、 $c$ はUASB装置に投入した可溶化液のCOD濃度(mgCOD/L)、 $d$ はUASB装置から流出した可溶化液のCOD濃度(mgCOD/L)を表している。

#### (4) 供試汚泥

本実験で用いた供試汚泥は、山口県宇部市内の下水処理施設における分流式の曝気槽で発生した余剰汚泥である。これを自動濃縮機(TOMOE製P-V53804A)を用いて、SS濃度を10000mg/L～14000mg/L程度まで濃縮した。

下水汚泥の中で余剰汚泥を用いた理由は、この汚泥には異物の混入が少なく、実験装置の運転に関する維持管理が容易なためである。

#### (5) 分析方法

本実験で行った分析は $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、SS、VSS、COD、Mg、ガス発生量およびガス組成率である。

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ はモリブデン青吸光光度法により定量した<sup>26)</sup>。また、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ はインドフェノール青吸光光度法により測定した<sup>27)</sup>。SSおよびVSSはStandard Methods<sup>28)</sup>にしたがって測定した。

CODは全有機体炭素計(島津製作所製TOC-5000)によりTOCを定量した後にCODに換算した。なお、換算に用いた係数は32/12を用いた。この係数を用いて液中の炭素量を酸素量に変換することで、有機物の分解に必要な酸素量(COD)とした。

MgはICP発光分光分析装置(VARIAN社製VISTA-PRO型誘導結合プラズマ発光分析装置)により定量した。

表-2 リン回収先行型およびメタン回収先行型における運転条件

| run | 経過日数<br>day | リン回収先行型                                    |                                                          |          | UASB法           |             |
|-----|-------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------|-----------------|-------------|
|     |             | MAP法                                       |                                                          |          | 基質濃度<br>mgCOD/L | 流量<br>L/day |
|     |             | $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$<br>含有量<br>mg/L | $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$<br>添加量<br>mg/L | 反応量<br>L |                 |             |
| 1   | 0～17        | 100                                        | 1000                                                     | 6.0      | 3500            | 6.0         |
| 2   | 17～35       | 200                                        | 2000                                                     | 6.0      | 7000            | 6.0         |
| 3   | 35～104      | 200                                        | 2000                                                     | 12       | 7000            | 12          |
| 4   | 104～134     | 200                                        | 2000                                                     | 6.0      | 7000            | 6.0         |

| run | 経過日数<br>day | メタン回収先行型        |             | MAP法                                       |                                                          |          |
|-----|-------------|-----------------|-------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------|
|     |             | UASB法           |             | $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$<br>含有量<br>mg/L | $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$<br>添加量<br>mg/L | 反応量<br>L |
|     |             | 基質濃度<br>mgCOD/L | 流量<br>L/day |                                            |                                                          |          |
| 1   | 0～17        | 3500            | 6.0         | 100                                        | 1000                                                     | 6.0      |
| 2   | 17～35       | 7000            | 6.0         | 200                                        | 2000                                                     | 6.0      |
| 3   | 35～104      | 7000            | 12          | 200                                        | 2000                                                     | 12       |
| 4   | 104～134     | 7000            | 6.0         | 200                                        | 2000                                                     | 6.0      |

ガス組成率の測定はガスクロマトグラフ(島津製作所製GC-8APT)により行った。

### 3. 実験結果および考察

本実験で用いた運転条件を表-2に示す。リン回収先行型は、まずMAP法を用いて可溶化汚泥からリンを回収し、その後UASB法を用いて可溶化汚泥からメタンを回収する運転方法である。一方のメタン回収先行型は、UASB法を用いて可溶化汚泥からメタンを回収し、その後、MAP法を用いて可溶化汚泥からリンを回収する運転方法である。

本研究における各工程の連続供給に関する方法は以下の通りである。まず、下水処理施設に設置した実験装置を使って汚泥を可溶化させた。得られた可溶化汚泥は、宇部工業高等専門学校にある200L容器に冷蔵保存(温度は10℃程度)した。リン回収先行型は冷蔵保存した可溶化汚泥を20L容器に規定量だけ投入し、リン回収を行った。次にリン回収後の可溶化汚泥をUASB装置に投入し、メタン回収を行った。これに対して、メタン回収先行型は冷蔵保存した可溶化汚泥をUASB装置に投入し、メタン回収を行った。次にメタン回収後の20L容器に貯留した可溶化汚泥からリン回収した。なお、両運転型におけるリン回収工程での貯留に関する時間差の影響でリン回収量に差が生じる可能性があるが、1日程度であったため大きく影響しないものと考えた。

#### (1) リン回収に関する最適プロセスの検討

両運転型における $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 除去率および各工程の $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の変化を図-3に示す。自動濃縮機および実験装置の都合上、投入した汚泥のSS濃度および得られた可溶化液の $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度を一定にすることはできなかった(図-4参照)。そこで本実験では、廃水処理の評価において一般的に用いられてきた経時的変化による評価方法ではなく、図-3に示すように各工程における $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度を信頼水準0.95における信頼区間を推定する評価方法<sup>29)</sup>によ

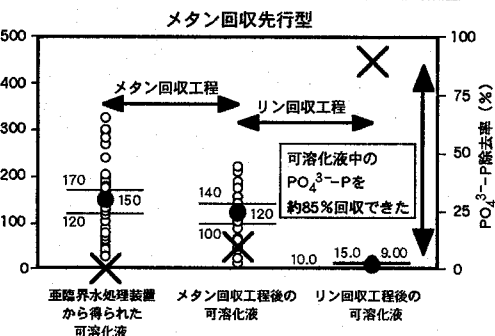
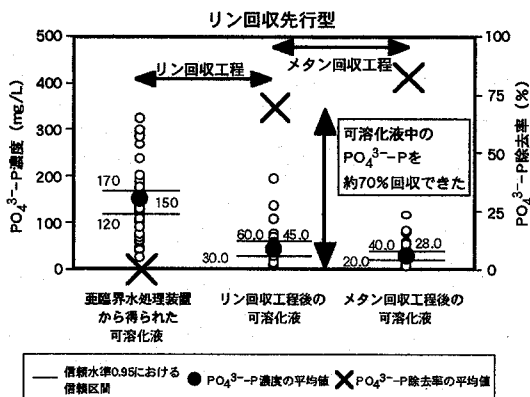


図-3 両運転型における  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  除去率の変化および各工程の  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  濃度変化

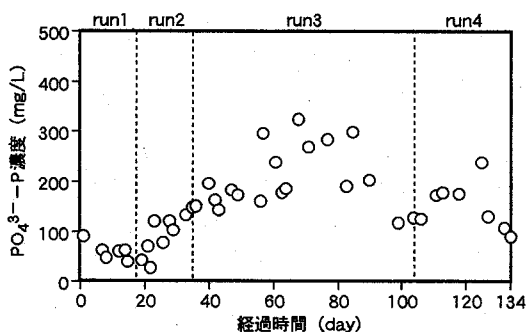


図-4 亜臨界水処理装置から得られた可溶化液中の  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  濃度変化

表-3 両運転型におけるリン回収工程時の可溶化液中の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  および COD 濃度

| 運転型      | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度 (mmol/L) | COD 濃度 (mgCOD/L) |
|----------|--------------------------------------|------------------|
| リン回収先行型  | 14.0~16.9                            | 5800~7300        |
| メタン回収先行型 | 28.4~40.4                            | 2800~3900        |

た。なお、この評価は run1 ~ run4 まで全データを対象とした。

リン回収先行型では、リン回収工程で可溶化液中の  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  を 70% 程度回収できた。これに対して、メタン回収先行型は、リン回収工程で可溶化液中の  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  を 85% 程度回収できた。このように、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  除去率の結果から、可溶化液から多く  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

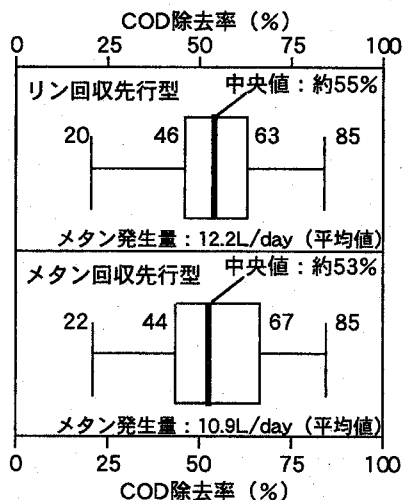


図-5 両運転型におけるメタン発生量ならびに箱ひげ図を用いた COD 除去率

P を回収させ得る運転型はメタン回収先行型であることがわかった。

両運転型の  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  除去率に差が生じたのは、リン回収時の可溶化液に含まれていた  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  および  $\text{Mg}^{2+}$  のモル数が変化したことによると考えられる。両運転型におけるリン回収工程時の可溶化液に関する  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  のモル濃度および COD 濃度は表-3 の通りである。表-3 の算出方法は図-3 と同様に区間を推定する方法<sup>29)</sup> によった。なお、この評価は run1 ~ run4 まで全データを対象とした。

可溶化液中の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  が  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  に対して過剰であれば、ほぼ完全に  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  が回収できる<sup>18)</sup> ことが知られている。しかしながら、本実験で用いた可溶化液中には、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  に対して過剰の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  が含まれていた (表-1 参照) ため、主な原因ではないと考えられる。

一方、高級脂肪酸は電離して陰イオンとして液中に存在しており、 $\text{Mg}^{2+}$  と結合して脂肪酸金属塩 (いわゆる石鹸) を形成する<sup>30)</sup> ことが知られている。さらに NaOH と高級脂肪酸でけん化を生じることが知られている。このことから、リン回収先行型は、前もってメタン回収工程で可溶化液中の有機物が除去されないためリン回収工程で Mg および Na を添加した場合に、これらと有機物とが結合して脂肪酸金属塩を形成したものと推測される。これによって、MAP 生成する  $\text{Mg}^{2+}$  のモル数が不足し、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  除去率が低下したものと推測される。一方のメタン回収先行型は、リン回収工程の前に可溶化液の有機物は除去されており (表-3 参照)、メタン回収先行型のリン回収工程時に添加した Mg は MAP を生成し、高い  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  除去率を得ることができたと推察される。

以上より、可溶化液から  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  を多く回収できる運転型は、メタン回収先行型であることがわかった。

## (2) メタン回収に関する最適プロセスの検討

両運転型におけるメタン回収工程で得られた COD 除去率の分布を比較するため、もとなるデータの分布をよく表すことのできる箱ひげ図<sup>31)</sup> を使って検

討した。両運転型における最小値、第1四分位点、第2四分位点（これを中央値と称す）、第3四分位点、および最大値を図-5に示す。ここで用いた第1四分位点は、中央値以下のデータの中央値を示し、第3四分位点は、中央値以上のデータの中央値を示している<sup>30)</sup>。なお、この評価はrun1～run4まで全データを対象とした。

リン回収先行型のCOD除去率の中央値は約55%であり、メタン発生量は12.2L/day程度であった。これに対して、メタン回収先行型は約53%であり、メタン発生量は10.9L/day程度であった。また、リン回収先行型のCOD除去率に関する四分位範囲は約46%～約63%であり、一方のメタン回収先行型は約44%～約67%であった。このようにメタン発生量ならびにCOD除去率の変化から、有意差は確認されなかった。

以上より、MAP法もしくはUASB法を入替えても、亜臨界水処理により可溶化された汚泥からのメタン回収量は変化しないことがわかった。

### (3) リンおよびメタン回収に関する最適プロセスの検討

リン回収先行型ならびにメタン回収先行型を連続的に運転し、可溶化汚泥からのリンおよびメタン回収量の差を把握した。実験結果から、リン回収先行型は液中の $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ を70%程度回収でき、メタン回収先行型は、85%程度回収できたことから、リン回収量に変化が生じた。これに対して、両運転型のメタン回収量については、メタン発生量ならびにCOD除去率の変化から、有意差は確認されなかった。これらの結果から、余剰汚泥資源化プロセスには、リンを多く回収することができるメタン回収先行型を用いばよいことがわかった。

これまでの実験<sup>18), 32)</sup>で、汚泥から糖、タンパク質、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ および $\text{NH}_4^+-\text{N}$ を個別に多く溶出させる亜臨界水処理の設定温度を検討した。これらの実験<sup>18), 32)</sup>で得られた知見に今回の実験結果を適用することで、本研究グループが提案する余剰汚泥資源化プロセスの実用化が促進されるものと期待される。

## 4. まとめ

本実験では、本研究グループが提案した汚泥の資源回収型処理プロセスを構築するため、可溶化汚泥からリンおよびメタンを多く回収できるプロセスの最適化について、リン回収先行型とメタン回収先行型の2つのケースについて実験的な検討を行った。具体的な実験内容は、山口県宇部市内の下水処理施設で発生した余剰汚泥を対象に、実験装置を用いて可溶化した。次に可溶化汚泥を、MAP法からUASB法を経るリン回収先行型とUASB法からMAP法を経るメタン回収先行型とで連続運転を行った。そして、どちらの運転型が資源回収型処理プロセスとして最適であるかを検討した。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- ・可溶化液から $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ を多く回収できる運転型は、メタン回収先行型であることがわかった。
- ・汚泥の資源回収型処理プロセスのMAP法もしくはUASB法を入替えても、メタン回収量に有意差はないことがわかった。

・リンが多く回収できるメタン回収先行型を余剰汚泥資源化プロセスに用いれば、汚泥が高効率に資源化できることがわかった。

謝辞：本実験の実施にあたり、山口大学大学院の博士前期課程の吉田健一君、村上奉行君、宇部工業高等専門学校技術室の三吉克己さん、渡邊美紀さん、山口県産業技術センター専門研究員の有村一雄さんに多大な助力をいただきました。ここに記して深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 谷川昇：変革期を迎えた焼却処理 新処理技術の展開，廃棄物学会誌，第9巻，第7号，pp.470-486，1998。
- 2) 田中勝：廃棄物研究の動向と新たな戦略，季刊環境研究，第129号，pp.18-26，2003。
- 3) 加藤聖：特集 下水汚泥有効利用の現状と新技術について 解説 下水汚泥有効利用の現状と新技術について，再生と利用，第27巻，第106号，pp.22-28，2004。
- 4) 三宮武：下水汚泥を巡る“連携”のあり方「バイオマス・ニッポン総合戦略」と「連携」の重要性一循環型社会構築に向けてのネットワークづくり，月刊下水道，第26巻，第12号，pp.8-11，2003。
- 5) 小田部廣男：リン資源の現在と未来，石膏と石灰，第210号，pp.307-316，1987。
- 6) 稲森悠平，宝月章彦，田原邦彦：第5次水質総量規制対応 食品工場排水の最適処理ハンドブック，サイエンスフォーラム，pp.402，2002。
- 7) 稲森悠平，野田尚宏，水落元之，須藤隆一：第5次水質総量規制のポイント 生活系排水におけるCODおよび窒素・リンの低減に向けて，月刊地球環境，第32巻，第3号，pp.92-96，2001。
- 8) 吉田隆：バイオマスエネルギーの特性とエネルギー変換・利用技術 地域特性にあった技術選定・最適プロセスの構築から事業採算性・市場展望まで，株式会社エヌ・ティー・エス，pp.236，2002。
- 9) 野池達也：メタン発酵法によるバイオマスエネルギーの生産に関する研究の現状，ブレインテクノニュース，第93巻，pp.1-4，2002。
- 10) V.アラヴィンタン，味楚俊，佐藤弘泰，滝沢智，松尾友矩：発酵汚泥量の減容のためのアルカリ・酸・熱処理における汚泥可溶化，環境工学研究論文集，第35巻，pp.189-198，1998。
- 11) Goel R, Tokutomi T, Yasui H, Noike T : Optimal process configuration for anaerobic digestion with ozonation, Water Sci Technol, Vol.48, No.4, pp.85-96, 2003.
- 12) Neyens E, Baeyens J, Creemers C : Alkaline thermal sludge hydrolysis, J Hazard Mater, Vol.97, No.1/3, pp.295-314, 2003.
- 13) Shiota N, Akashi A, Hasegawa S : A strategy in wastewater treatment process for significant reduction of excess sludge production, Water Sci Technol, Vol.45, No.12, pp.127-134, 2002.
- 14) 今井剛，浮田正夫，深川勝之，河村友喜，関根雅彦，樋口隆哉：高速回転ディスクによる余剰汚泥の高効率可溶化処理に関する研究，環境工学研究論文集，第38巻，pp.131-139，2001。
- 15) 見手倉幸雄，古崎康哲，笠原伸介，石川孝宗，榑原隆司，安藤卓也：超音波を用いた余剰汚泥削減システムに関する研究，環境工学研究論文集，第39巻，pp.31-41，2002。
- 16) 名和慶東，加畑堅太郎：注目される余剰汚泥減容化技術 ユニチカ（株）ミル破砕式余剰汚泥減容化システム，資源環境対策，第39巻，第5号，pp.86-87，2003。
- 17) Barber W.P. : The effects of ultrasound on sludge digestion,

- Water Environ Manag J, Vol.19, No.1, pp.2-7, 2005.
- 18) 荒金光弘, 今井剛, 村上定瞭, 竹内正美, 浮田正夫, 関根雅彦, 樋口隆哉: 亜臨界水処理およびMAP法を用いた下水汚泥からのリン回収に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 第16巻, 第4号, pp.309-317, 2005.
  - 19) 高島正信, 田中義人: 下水汚泥の嫌気性消化における熱酸化処理の効果, 環境工学研究論文集, 第42巻, pp.377-383, 2005.
  - 20) Weemaes M P J, Verstraete W H: Evaluation of current wet sludge disintegration techniques., J Chem Technol Biotechnol, Vol.73, No.2, pp.83-92, 1998.
  - 21) 今井剛, 荒金光弘, 浮田正夫, 関根雅彦, 樋口隆哉, 村上定瞭, 竹内正美: 亜臨界水処理およびUASB法による下水汚泥からのメタンガス回収に関するパイロット実験, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, VII-028, pp.55-56, 2005.
  - 22) 今井剛, 荒金光弘, 浮田正夫, 関根雅彦, 樋口隆哉, 渡邊美紀, 村上奉行, 村上定瞭, 竹内正美: 亜臨界水処理と晶析法(HAP法およびMAP法)の組合せによる下水汚泥からのリン回収, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集(その1), pp.380-382, 2005.
  - 23) 荒金光弘, 今井剛, 村上定瞭, 竹内正美, 浮田正夫, 関根雅彦, 樋口隆哉: 連続式亜臨界水処理法およびUASB法の組合せによる下水汚泥からのメタンガス回収に関する実験的研究, 環境工学研究論文集, 第42巻, pp.415-422, 2005.
  - 24) H.S.Shin and S.M.Lee: Removal of nutrients in wastewater by using magnesium salts, Environ Technol., Vol.19, pp.283-290, 1997.
  - 25) K.Demeestere, E.Smet, H.Van, Langenhove and Z.Galbacs: Optimisation of magnesium ammonium phosphate precipitation and its applicability to the removal of ammonium, Environ technol., Vol.22, pp.1419-1428, 2001.
  - 26) 小垣原尚生: 下水試験方法上巻, 社団法人日本下水道協会, pp.192-194, 1997.
  - 27) 社団法人日本生物工学会: 生物工学実験書, 培風館, pp.410-411, 2002.
  - 28) American Public Health Association: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Edition. Washington, D. C., pp.2540D-2540E, 1992.
  - 29) 小寺平治: 新統計入門, 株式会社 華房, pp.82-91, 2004.
  - 30) 花木啓祐, 松尾友矩, 長瀬道彦: 嫌気性消化における脂肪酸の代謝, 下水道協会誌, 第18巻, 第207号, pp.30-39, 1981.
  - 31) 滝沢智: 新・工科系の数学 環境工学のための数学, 株式会社 数理工学社, pp.14-17, 2004.
  - 32) 今井剛, 荒金光弘, 浮田正夫, 関根雅彦, 樋口隆哉, 村上定瞭, 竹内正美: 亜臨界水処理を用いた余剰汚泥の資源化における加水分解プロセスの促進に関するアルカリ添加の影響, 第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集(その1), pp.409-411, 2004.

(2006.5.26 受付)

## Study on Optimum Process of Resource Recovery from Sobubilized Excess Sludge Treated by Subcritical Water Process Combined with MAP and UASB Method

Mitsuhiro ARAKANE<sup>1</sup>, Tsuyoshi IMAI<sup>1</sup>, Sadaaki MURAKAMI<sup>2</sup>

Masami TAKEUCHI<sup>2</sup>, Masao UKITA<sup>1</sup>, Masahiko SEKINE<sup>1</sup> and Takaya HIGUCHI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

<sup>2</sup>Dept. of Chemical and Biological Engineering, Ube National College of Technology

A new process, in which subcritical water process was applied to hydrolyze and solubilize the excess sludge whereafter phosphorus and methane were recovered by MAP and UASB method respectively, was developed by our research group. It was confirmed feasible that phosphorus and methane could be recovered by MAP and UASB process respectively from the solubilized excess sludge. However, there was no information that the difference in the recovery rates of phosphate and methane had occurred by changing the sequence of MAP and UASB process. In this study, the optimum process of phosphorus and methane recovering with MAP and UASB method from solubilized excess sludge was investigated. According to the experiments results, the optimum resource recovery process were in the sequence of UASB and then MAP method.