

特集：下水道技術が支える市民生活

資源・エネルギーを回収する下水道

日高 平* 内田 勉**

1. はじめに

下水道においても、地球規模の環境問題への対応が求められている。下水道施設を都市の有する新たな財産として、下水道を核とした各種有機性廃棄物からの資源・エネルギー回収が近年着目されている。下水処理場で発生する下水汚泥は貴重な資源であり、建設資材利用、緑農地利用などのマテリアル利用やエネルギー資源としての利用について、様々な技術開発が行われている。本稿では、下水からの資源・エネルギー回収に関する現状や、これまで関連する研究に取り組んできた土木研究所での、最近の研究例を紹介する。

2. 我が国の下水道における状況

2.1 概況

2005年には長期的視点からみた今後の下水道の方向性が「下水道ビジョン2100」として取りまとめられた。その施策方針の一つとして、水環境の保全など下水道の有する機能に加え、下水道の有する資源回収・供給機能を積極的に活かして、下水処理場のエネルギー自立や地球温暖化防止などに貢献する「資源のみち」の創出が盛り込まれている。

2.2 下水汚泥のマテリアル利用

下水汚泥のマテリアル利用についてのまとめを図-1に示す。建設資材利用、緑農地利用などにより、下水汚泥リサイクル率として77%（2009年度）にまで達しており、これはセメント原料化量の増加によるところが大きい。

2.3 下水汚泥からのエネルギーの回収

下水汚泥の、消化ガス、汚泥燃料などとしてエネルギー利用される割合は1割程度に止まっており（図-2）、下水熱やリンなどを含めた資源・エネルギーの再生利用の状況は、全体として低水準にある。そこで、下水処理場における汚泥の消化プロセスで発生するメタンガスの有効利用のさらなる拡大が求められている¹⁾。消化ガスの利用方法としては、消化槽の加温、管理棟の空調、都市ガスとしての利用、自動車燃料としての利用、消化ガス発電、燃料電池による発電などが挙げられる。消化ガス発電では、ガスエンジンやガスタービンに用いられる。消化ガスを都市ガスと同等の水準に精製し民間ガス会社のガス導管に注入する施設や、燃料電池の導入例も見られる。また、下水汚泥の固形燃料化技術は、焼却に変わる技術として注目を集めるようになってきている。

2.4 リン資源の回収

肥料などとしての利用価値の高いリンについては、2006年において、下水道に我が国のリン輸入量の約1割が流入していたものの、コンポストとしての利用の1割に限られていた（国土交通

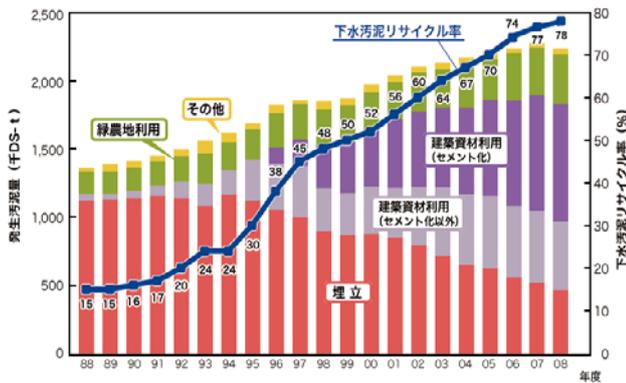
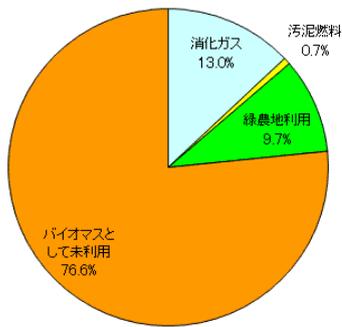


図-1 下水汚泥のマテリアル利用の推移（国土交通省）



（総バイオマス量177万トン）

図-2 下水汚泥中のバイオマス*の利用（2008年度）
（国土交通省）

Resource and energy recovery from sewage
*土木用語解説：バイオマス

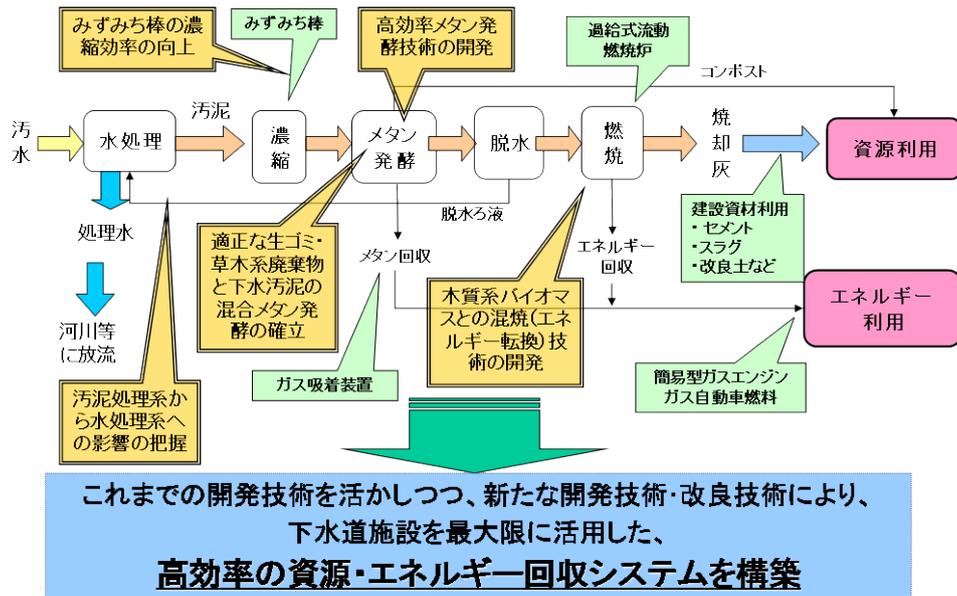


図-3 低炭素型水処理・バイオマス利用技術の開発に関する研究

省)。従来リンは、閉鎖性水域の水質保全などの観点で、除去すべき対象であった。世界的なリン資源のひっ迫などを背景に国内の肥料価格が上昇したことから、下水や下水汚泥に含まれる貴重な資源として、リンなどの回収、活用が求められるようになった。

3. 土木研究所の関連研究例

これらの背景をふまえて土木研究所で取り組んでいる下水からの資源・エネルギー回収に関する様々な研究の状況を、以下に紹介する。

3.1 低炭素型水処理・バイオマス利用技術の開発に関する研究

研究の概要は図-3に示すとおりである。下水処理場におけるメタン発酵を核として、地域のバイオマスの受入などを含めて、周辺の技術開発に取り組んでいる。

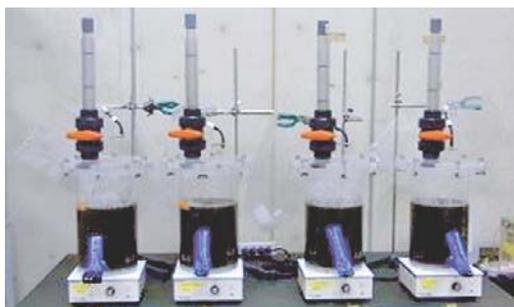


図-4 メタン発酵反応器の例

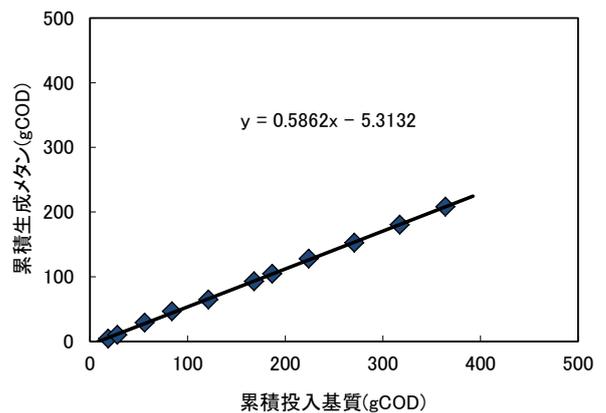


図-5 連続実験における累積投入基質量と累積生成メタン量の関係

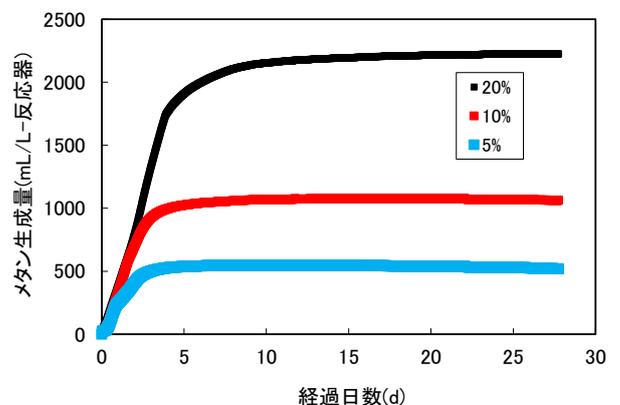


図-6 回分式実験1でのメタン生成の経時変化

- (1) 高濃度汚泥および地域バイオマスの混合消化に関する研究
地域のバイオマスを下水処理施設で受け入れる

場合、負荷が高まるので、既設処理場を活用する場合には受入可能な余裕があるかが重要である。負荷率の増加に対応する手段として、中温から高温条件への変更や、投入汚泥の高濃度化が考えられる。そこで、一般的な混合汚泥よりも高濃度である蒸発残留物 (TS) 5%程度の混合汚泥を基質として、実験室規模の反応器 (図-4) の連続運転を中温 (35℃) 条件下で行い、その処理特性を調査した。投入汚泥は、都市下水処理場の混合汚泥を用いた。混合汚泥の濃度はTS 3~4%程度であるので、実験室での遠心分離操作により、5%程度まで濃縮した。基質投入および消化液の引抜操作は1日1回の頻度にて手動で行った。

投入TSおよび有機物の指標である強熱減量 (VS) の実測値が平均でそれぞれ5.1および4.3 % であり、消化汚泥ではそれぞれ平均2.4および1.7%程度を安定して維持していた。既設の消化槽での平均的なVSベースでの消化率は60%程度であり、同程度の消化率が得られた。アンモニア性窒素濃度はおおむね1,000 mgN/L以下であり、メタン発酵への阻害影響はなかった。物質収支を把握するために、有機物量を酸化剤により分解したときの酸素消費量で表すCOD_{Cr}の測定も行った。累積投入基質量 (gCOD) と累積生成メタン量 (gCOD) の関係を図-5に示す。運転開始22日目~96日目の結果をまとめたものであり、全期間

を通じてCODベースで60%程度の安定したメタン転換が示された。混合汚泥および消化汚泥のCOD_{Cr}/VS比はいずれも1.6程度であったことから、既設消化槽と同程度のメタン転換率が得られていたことが示された。本研究での負荷率1.8 kgTS/ (m³・d) 程度で、アンモニアや揮発性脂肪酸 (VFAs) の蓄積は特に見られなかったことから、負荷率のさらなる向上は可能であると考えられる。

消化汚泥および混合汚泥を用いて、混合汚泥の体積比を0、5、10および20%とした4系列について、35℃にて途中では基質投入などを行わない回分式実験1を行った。実験結果は図-6に示すとおりであり、ブランクによるメタン生成量を差し引き、反応器体積あたりに換算して示している。最終的なメタン生成量はおおむね投入量に比例していたことから、本手法により、メタン転換の評価が可能であることが示された。

別の都市下水処理場の消化汚泥および混合汚泥、ならびに他バイオマスの例として食品廃棄物 (おからおよび豆皮) を用いて、55℃にて回分式実験2を行った。ここでは、消化汚泥のみのブランク系、消化汚泥 (体積比90%) および混合汚泥 (体積比10%) の下水汚泥系、下水汚泥系に食品廃棄物をさらに5 gVS/L添加した系を設定した。混合汚泥、おからおよび豆皮のメタン転換率は

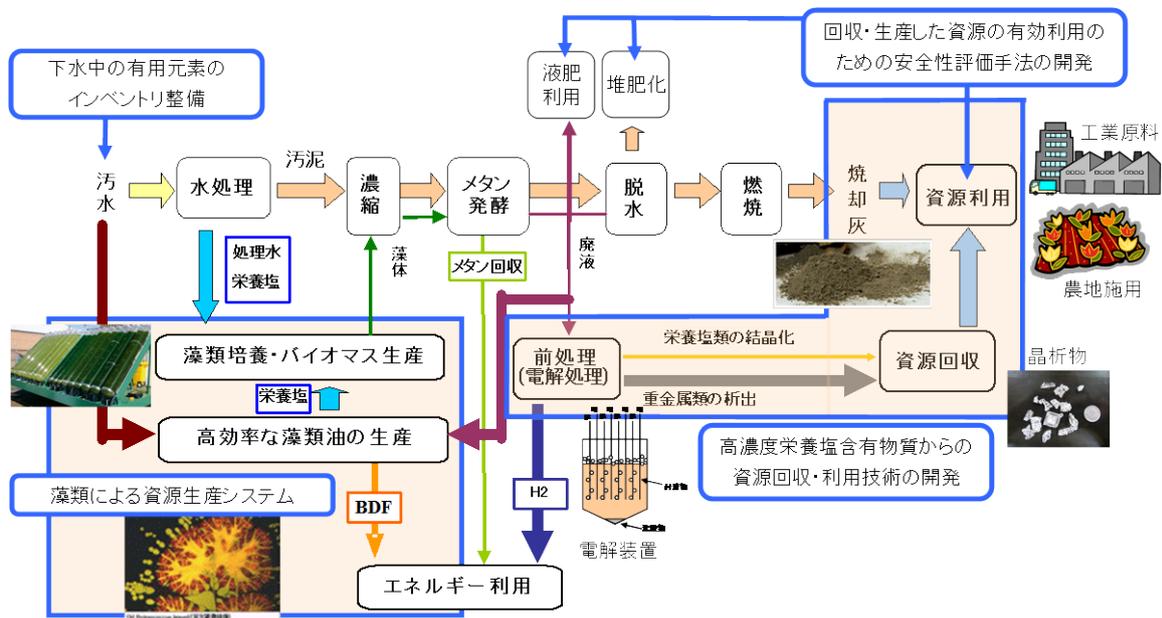


図-7 下水道を核とした資源回収・生産・利用技術に関する研究

CODベースでそれぞれ60%、45%および50%程度であった。今後下水処理場でこうした食品廃棄物を受け入れることが、メタン発酵の観点では可能であると考えられた。

(2) みずみち棒の現状調査

下水汚泥の効率的な嫌気性消化処理では、その前段階で濃縮処理が必要である。重力濃縮は構造が簡単でランニングコストも他の濃縮方式に比べ安価であるため、古くから多く採用されてきた。既存の重力濃縮槽を活かし、簡易な構造で重力濃縮プロセスの効率化を図るための装置として開発されたのが「みずみち棒」である。みずみち棒は、既に10市町で導入されている。

平成23年度には、導入済みの処理場を訪問し、関係者へのヒアリング調査を行い、現場での課題などを調査した。また、「平成23年度みずみち棒を用いた重力濃縮技術検討会」を土木研究所にて開催し、導入自治体関係者からも意見を頂いた。北海道地方は気温が低いこともあり、スカム発生などの心配もなく、みずみち棒による効果を確認することができた。ただし、みずみち棒の棒間が目詰まりを起こすという問題も一部で見られた。四国および九州地区では、みずみち棒導入後、引抜き汚泥の濃度は向上したという結果が得られた一方、向上しなかった事例もあった。温暖な地域では、腐敗によるガスが汚泥に付着し汚泥を浮上させ、スカムが発生するといった問題が見られた。引抜き汚泥の濃度は向上しなくても、みずみち棒導入によりスカムの発生が抑えられているため、汚泥に付着したガスをみずみち棒により再び分離させる効果がある可能性も考えられる。これらの調査をふまえて、平成23年10月には、「みずみち棒導入に関する技術資料集（案）Ver. 2.0」を公開した。

3.2 下水道を核とした資源回収・生産・利用技術に関する研究

研究の概要は図-7に示すとおりである。都市域で大量の栄養塩が集約される下水処理場の立地を活かした効率的な要素技術の開発が目的である。窒素やリンといった栄養塩類を、液肥利用や堆肥化として回収する技術についての検討を行っている。また、バイオマスとして利用価値の高い藻類を積極的に培養し、高度な栄養塩類の回収を行うための技術開発を行っている。実際の処理場にお

いても連続的に下水を供給する実証レベルで藻類を培養し、培養条件の最適化を図り、バイオ燃料としての性状を評価し、全国および海外にも展開できる技術の開発を目指している。

消化汚泥脱水分離液を対象に、電解処理を組み合わせたリン回収実験を行ったところ、10%程度のリンを回収することができた。下水処理水のみを用いた藻類培養実験を行ったところ、藻類の培養が可能で、種が流速や培養日数により異なることが確認された。培養した藻類を用いたメタン発酵実験を行ったところ、メタン転換率は下水汚泥の約7割程度であるものの、メタン発酵可能であることが示された。こうした技術の可能性が示されつつあり、実用化に向けた実験的検討を引き続き行っている。

4. おわりに

ここに示したプロジェクトに加えて、土木研究所では、他の研究機関や大学などの研究者と共同で、環境省や農林水産省からの研究費によるプロジェクトもいくつか実施している。下水道の研究する上でも、下水道の枠組みを超えた議論が必要である。技術的な開発のみならず、法制度の整備など、課題は山積みであり、実現に向けた地道な研究および活動を続けていく予定である。

謝 辞

ここで紹介した研究では、下水処理場をはじめとして多くの関係者らの協力を得ている。ここに記して、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 日高平、内田勉：下水道を核としたバイオマスの利活用—メタン発酵によるエネルギー回収—、土木技術資料、第54巻、第9号、pp.51～52、2012。

日高 平*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料資源研究グループサイクルチーム 主任研究員、
博士（工学）
Dr. Taira HIDAHA

内田 勉**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料資源研究グループサイクルチーム 上席研究員
Tsutomu UCHIDA