

有機性廃棄物から有用産物への変換技術の確立

建設工学専攻 高島正信

1) 本研究の背景と意義

近年、汚泥・生ごみ・家畜排せつ物など処理・処分すべき廃棄物系バイオマスの量は増大しており、その一方で資源の枯渇が世界的に懸念されている。メタン発酵プロセスは、廃水・廃棄物を処理すると同時にメタンガスを最終産物として生成し、発酵残渣の再利用も可能であることから、エネルギー・資源循環型のプロセスとして導入が増えており、処理対象の拡大も期待されている。また最近では、乳酸は生分解性プラスチックの原料、水素は燃料電池の直接的原料として需要が高いため、これら嫌気性発酵の中間代謝物質を優先的に生成させる研究も盛んである。さらに、あと数十年で枯渇すると推定されている重要元素としてリンや重金属があり、廃水・廃棄物の処理過程における回収が切望されている。

このように近年では、サステナブルな社会の構築のために廃棄物系バイオマスが保有するエネルギー・資源の回収や有効利用が強く求められており、これを達成する技術の開発は意義の大きいものがある。期待される効果（社会への貢献など）として、循環型社会の形成や地球温暖化の防止など広く環境保全に貢献することが可能であり、また、地域における産業の育成や活性化につながることも期待できる。

2) 本研究の目的

本研究は、廃棄物系バイオマスから、嫌気性微生物等を用いてメタンなどの有用な代謝産物を効率的に生産する技術を確認することを目的とする。主な処理対象および代謝産物は、以下のようである。

- ・処理対象 汚泥、生ごみ、作物残さなど
- ・有用産物 メタン、水素、有機酸、リン、肥料など

本研究では嫌気性発酵の最終代謝物に加え、中間代謝物（図1参照）や発酵残渣、原料中に含まれる無機物も対象とする。

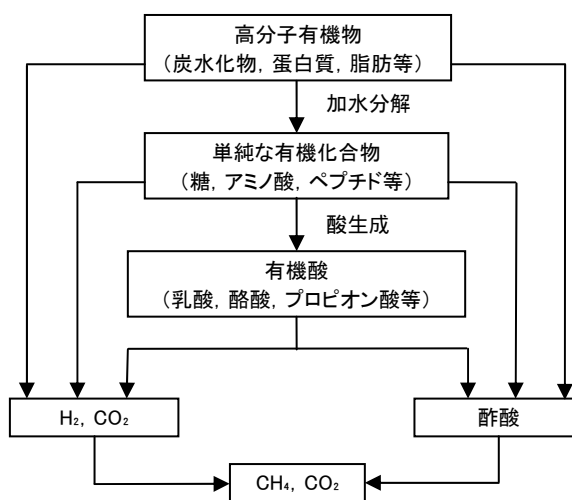


図1 嫌気性発酵の代謝経路

3) 結果 (実験手法を含む) と考察

3-1 加熱処理

廃棄物系バイオマスのメタン発酵を改善する手段として、pH 酸性下の加熱処理（以下、酸加熱処理）を組み合わせることを考案し、その条件やプロセス形態について検討した（環境工学研究論文集, 2005；環境工学研究論文集, 2006；J. Chem. Technol. Biotechnol., 2008；J. Env. Eng., 2008）。温度 170、pH 5~6、処理時間約 1 時間の酸加熱処理（塩酸または硫酸を使用）を汚泥返送ラインで行う後処理方式で適用したところ（図 2）、固形物分解率は

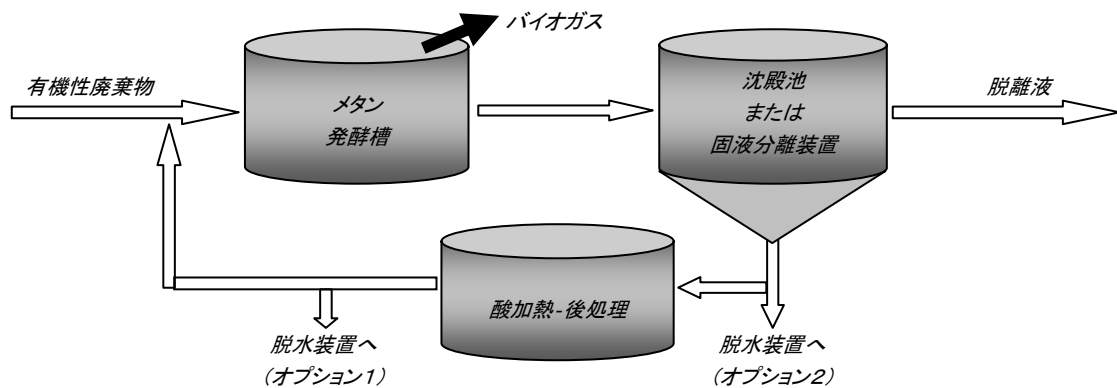


図2 酸加熱-後処理メタン発酵プロセス

約 2 倍に向上し、メタン発生量と污泥脱水性も改善された。この後処理方式は、一旦メタン発酵された後の固形物に加熱処理を施すので、加熱処理を難分解成分のみに集中することができる。また、酸加熱処理の利点として、污泥の脱水性が著しく改善される。

3-2 リン除去・回収

本実験では、メタン発酵槽（中温、HRT20 日）と固液分離槽から成る実験システムに硫酸を添加することによるリン溶出について検討した（環境工学研究論文集, 2007；環境工学研究論文集, 2008）。メタン発酵槽に系列 1：0、系列 2：80 または系列 3：160 μ L/d（0、29～33 または 59～66 μ L/g 流入 SS に相当）で硫酸を添加すると、硫酸添加量が多くなるにつれリン酸溶出量が増えることが認められた（図 3）。硫酸添加量 160 μ L/d で最大濃度が得られ、下水污泥（T-P302mg/L）を処理したとき平均 112mg/L、リン酸鉄が添加された模擬凝集污泥（T-P855mg/L）を処理したとき平均 461mg/L の PO₄-P 濃度に達した。これは、メタン発酵槽内の硫酸塩還元によって生物学的に生じた硫化物イオンが、下式のように汚泥中のリン酸と置換され、リンが化学的に溶出すると推測される。



よって、メタン発酵槽への硫酸の添加は汚泥からのリン酸溶出を促すことがわかり、メタン発酵工程の後にリンの回収工程を設ければ、枯渇資源であるリンを汚泥から高効率に回収できることが示唆された。

3-3 水素・有機酸発酵

本実験では、嫌気性発酵において有用な中間代謝物質の生成を卓越させ、その収率を向上させる条件について検討した。水素発酵ならびに乳酸発酵の主反応式は以下である。

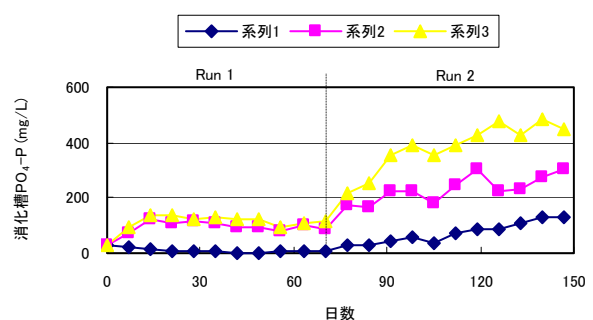


図3 リン溶出の実験結果

連続実験では、基質：グルコース、滞留時間：0.5 または 1.0 日、温度：25 または 35 、圧力：0.1 または 0.01MPa、種汚泥：消化汚泥またはオートクレーブした消化汚泥、回分実験では基質：グルコースまたはスクロース、pH：4 または 6、種汚泥：コンポスト汚泥を採用した。実験の結果、乳酸発酵については連続実験で変換率 57%が得られ、高い負荷条件におけば比較的容易に高収率を達成できることがわかった。水素発酵では、回分実験のスクロース、pH4、コンポスト汚泥の条件でもっとも収率が高く、次いで連続実験のグルコース、滞留時間 1.0 日、35 、オートクレーブした消化汚泥の条件であったことから、種汚泥からメタン生成菌が排除されていることが重要であると思われる。しかし、水素収率はまだ低く、関与する生成・消費の代謝経路が数多く存在することが示唆され、今後さらに検討が必要である。

3-4 重金属除去・回収

メタン発酵残渣に有害な重金属が多量に含まれていれば、その再利用における用途が限定されてしまうため、本実験ではバクテリアリーチング法による下水汚泥からの重金属除去について基礎検討した。三角フラスコに下水汚泥を 300mL 入れ、条件 1 は無添加、条件 2 は Fe(II)100mg/L、条件 3 は Fe(II)1,000mg/L 添加し、室温で 2 週間振とう培養し、金属の溶出を観察した。亜鉛と銅についてみた結果(図 4) Zn についてはどの条件でも 70~80% の溶出率が得られたが、Cu の場合には Fe(II) を 1,000mg/L 添加したときのみ溶出率が 80% に達した。

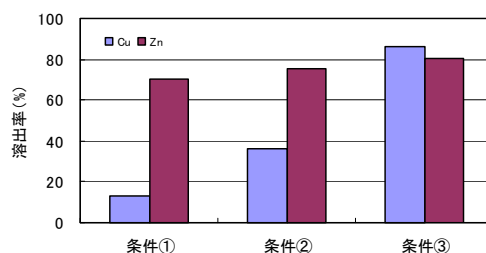


図 4 バクテリアリーチング実験における金属溶出率

このバクテリアリーチングと 3-3 のリン溶出・回収を組み合わせれば、硫黄の酸化還元サイクルを有効に作用させ、リンおよび重金属の両者を逐次的に除去・回収できることになる。

3-5 微量金属必要量

本実験では、メタン発酵微生物の活性化を目的として、高温および中温における必須微量金属 (Fe、Ni、Co および Zn) の必要量について検討した(表 1)。実験から、酢酸のような単純な基質よりグルコースの方が微量金属の必要量が高く、必要量が満足されれば高負荷でも安定した処理が可能なることがわかった。また、高温メタン発酵では中温より数倍も微量金属必要量が高く、微量金属の供給に注意が必要であることが明らかとなった。

表 1 微量金属の最小必要量 (単位: mg/g COD 除去)

基質	運転温度	Fe	Ni	Co	Zn
グルコース	高温	0.45	0.049	0.054	0.24
グルコース	中温	0.20	0.0063	0.017	0.049
酢酸	中温	0.023	0.0040	0.0030	0.020

3-6 堆肥化およびバイオマスの有効利用

本実験では、メタン発酵プロセスの適用範囲の拡大を目的として存在量が豊富で、廃棄されることの多い植物系バイオマスのメタン発酵性と、メタン発酵残さを含む廃棄物系バイオマスの堆肥化について検討した。実験の結果、紙、雑草、木とワラはメタン発生率が下水汚泥と同等または高く、十分にメタン発酵の原料になることがわかった(図5)。また、堆肥化によって良質の堆肥を製造でき、これによって種々のバイオマスを循環利用できることが実証できた(福井工業大学紀要, 2009)。これらの技術を適用すれば、現在の課題である地球温暖化や資源循環に役立たせることができると考えられる。

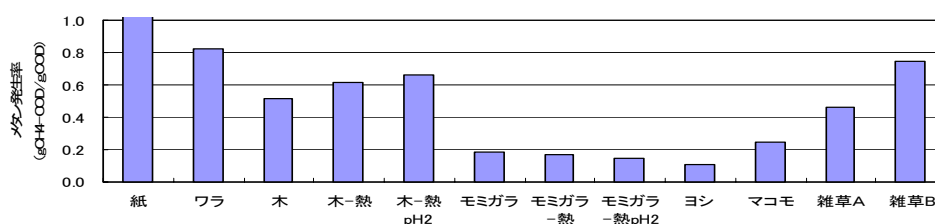


図5 植物系バイオマスのメタン発生率

4) 国内外の研究のなかで占める本研究の位置づけ

石油ショックやエネルギー価格の高騰などエネルギー事情が悪化すると、メタンガスを生成できるメタン発酵の研究が脚光を浴びるという歴史がある。近年はまさしく研究が盛んな時期にあたり、廃棄物系バイオマスの発生量も増大していることから、固形性廃棄物のメタン発酵プロセスの改善が試みられている。その中にはリアクター形態や運転条件、さまざまな物理化学的処理等の併用があるが、経済性も考慮すると効果が薄くなる。本研究は、回収・再利用が可能な加熱処理を応用して、できるだけ経済的なやり方によってメタン発酵プロセスの改善と適用性の拡大を試みたものである。

また、将来的には、原料中に存在する貴重な資源を多く回収でき、さらに発酵残さまで再利用できることが望ましい。そのために、リンおよび重金属の除去・回収や残さの肥料化を試みており、ここまで総合的に検討をしている研究はきわめて少ないと思われる。

5) 新規性、独創的な点

固形性廃棄物の処理効率向上を目的として、pH調整を行わない前処理方式が常識的であった従来方式に対して、本研究の方式は、加熱処理をpH酸性の後処理方式で組み合わせることに特徴がある。また、この場合、硫酸の使用に伴ってリンの回収も可能となる。これらを組み合わせることによって、固形物分解、バイオガス発生、汚泥脱水性とリン回収を同時に達成することに本提案プロセスの新規性・独創性がある。熱は回収・再利用が容易なので、加熱処理を前処理として組み合わせる方法が現在は実用化されており、本技術はこれをさらに改良した方法であると言える。また、微量栄養素はわずかな量で大きな影響を与えることが明らかとなり、特に高温発酵における必要量が中温よりも数倍も大きいことは新しい発見である。さらに、汚泥からのリン・重金属除去や発酵残さの再利用が十分に可能なことを示したことにも本研究の特徴がある。