



技術解説

嫌気性消化法による
廃棄物の再資源化

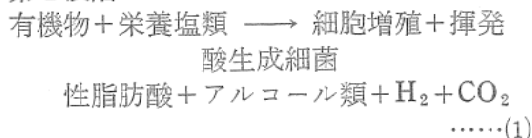
藤田正憲*

1. はじめに

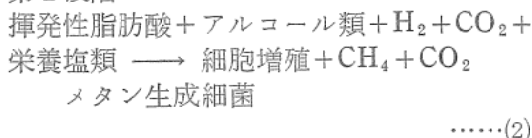
古くから動物の死骸や排泄物が分解する際にガスが発生し、不愉快な臭いが出ることは知られていたと思われるが、17世紀末まで、何んら科学的な検討が加えられなかった。18世紀後半には、このガスが燃えやすい性質を持つことが判り、さらにあとになってこれが主としてメタンガスであることが同定された。メタン醗酵は自然界では広く観察される現象であるが、これが下水の汚泥処理等に応用されたのは19世紀に入ってからであり、しかも現在の消化槽の原型である加温装置とガス捕集装置を備えた分離式密閉型消化槽が建設されたのは、1925年（ドイツ）あるいは1926年（アメリカ）に入ってからである。その後、嫌気性消化法は、下水汚泥のみならず尿尿、家畜糞尿、工場廃水（食品、薬品、製紙工場等）、都市廃棄物（生ごみ）などの処理法として、また再資源化法として広く応用されている。

嫌気性消化法のもつ特徴は、汚泥の減少、メタンガスの回収、汚泥の安定化・衛生化などであり、その消化過程は酸性醗酵期（第1段階）とアルカリ性醗酵期（第2段階）に分かれている。

第1段階：



第2段階：



第1段階では汚泥は可溶化され減少し、第2段階ではメタンガスの発生と同時にメタン生成細菌のもつ抗菌力により、大部分の病原菌は死滅し、植物種子は発芽を抑制される。

第1段階に関与する微生物は、大腸菌群、プロテウス属、脱窒、脂肪分解及びセルロース分解細菌など多種多様である。一方、第2段階に関与する微生物は、絶対嫌気性のメタン生成細菌であり、桿菌、球菌など多くの種類が知られている。又、その操作温度により中温消化法（35～39℃）、あるいは高温消化法（55～60℃）に分類されている。

嫌気性消化法に関する解説書は数多くみられるので、本稿では嫌気性消化法のもつ特徴を効果的に利用した、下水汚泥および農業廃棄物の再資源化について考察を試みた。

2. 下水汚泥の再資源化

Ghosh・Klass¹⁾ は(1)式の酸生成反応は、中温消化において下水汚泥では滞留時間0.5～1.0日で終了し、固形物の43%が減少することを報告した。この時、pHは5.7～5.9と低く、また上澄液中の揮発性脂肪酸は3.7～5.1g/lであった。脂肪酸の大部分は酢酸とプロピオン酸で、わずかに酪酸が含まれている。酢酸およびプロピオン酸はいずれも微生物の良好な炭素源として使用できるので、食糧及び飼料生産を主体とした再資源化システムとして図1のような方式が提案される。

ここでは、二相式嫌気性消化法を採用し、第1消化槽ではpH 5.7～5.9、滞留時間0.5日を、第2消化槽ではpH 7.0～7.4、滞留時間6.5日とした¹⁾。酸化還元電位は各々-240mV および-400mV 附近が良い。第1および第2消化槽からの消化汚泥は、脱水機を経て埋立、焼却、肥料等に処分される。第1消化槽からの濾液は

*藤田正憲 (Masanori FUJITA), 大阪大学, 工学部, 環境工学科, 助教授, 工学博士, 水質管理工学

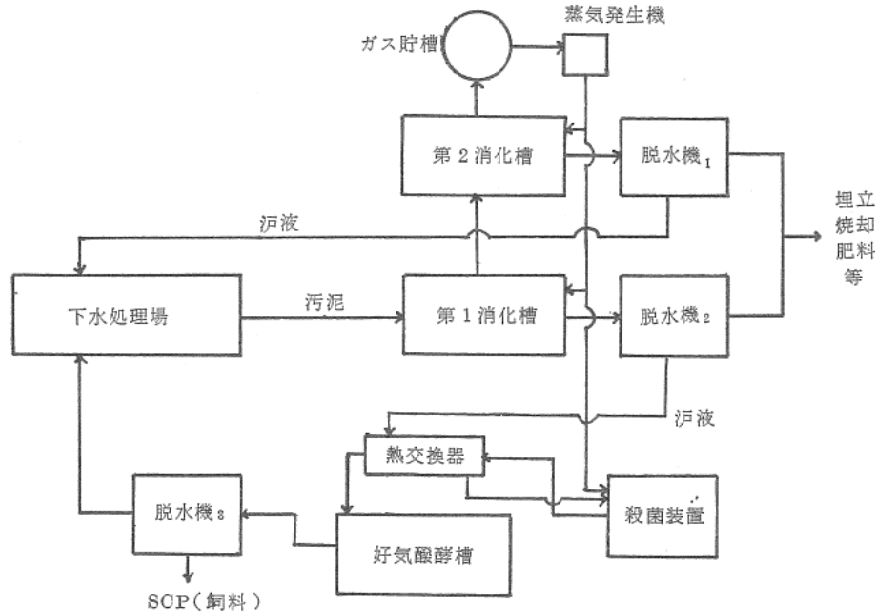


図1 2槽式消化槽を利用した汚泥の処理，再資源化システム案

表1 下水汚泥の嫌気性消化と biomass 生産における収支
(下水汚泥 V S 100kg を基礎にする)

| 項 目 | 液 量 | 乾 物 量 |
|-----------------|--------|-------------------|
| | ℓ | kg, V S |
| 汚泥： 4%(V S)スラリー | | |
| 第1槽投入汚泥 | 2,500 | 100 |
| 引抜汚泥 | 2,500 | 57 |
| 第2槽投入汚泥 | 955 | 21.8 |
| 引抜汚泥 | 955 | 21.8 |
| 好気槽流入基質 | 1,428 | 7.3(脂肪酸) |
| 流出基質 *1 | 1,428 | 2.9(biomass) |
| 脱水機1 排出量 | 884 | ケーキ**4 73kg 21.8 |
| 2 排出量 | 1,428 | " 117" 35.2 |
| 3 排出量 | 1,418 | " 10 2.9(biomass) |
| エネルギー： | | |
| 発生エネルギー | 98,810 | kcal |
| 汚泥予熱用 | | 57,500kcal |
| 第1槽保温用 *2 | | 177 |
| 第2槽保温用 | | 293 |
| 殺菌用 *3 | | 40,840 |

*1 収率係数 0.4 *3 熱交換器により70%熱回収
*2 保温良好 *4 水分70%

殺菌後，好気醗酵槽に導かれ，Hansenula酵母などの適当な微生物による菌体蛋白（SCP）生産に利用される。脱水機で biomass を回収後，濾液は下水処理場に返送される。一方，第2消化槽からの濾液は揮発性脂肪酸も少なく，そのまま下水処理場に返送される。第2消化槽からの余剰メタンガスは培地殺菌の熱源として利用される。本システムは完全な連続系として運転

可能である。

本システムによるエネルギーおよび物質収支を，汚泥 V S（揮発性固形物）100kg 当たりで示すと表1のようになる。本システム内では，エネルギーは過不足なくまかなえるように，第1消化槽からの汚泥を第2消化槽に配分した。また，本計算には次の仮定が含まれている。

消化温度 37℃

| | |
|---------------------|--------------------|
| 平均水温・気温 | 14℃ |
| 発生ガス量 ²⁾ | 0.465 l / g V S 添加 |
| メタンガス含量 | 65% |
| 揮発性脂肪酸濃度 | 5.1 g / l (酢酸換算) |
| 収率係数 | 0.4 (g 細胞 / g 基質) |
| 熱交換器効率 | 70% |

この他、装置の動力費が必要であるが、この一部は得られた biomass のコストにより補填し得ると考えられる。極めて大雑把な計算であるが、表から明らかなように、100kg V S から良質な蛋白質を含む biomass 2.9kg が得られ、排出される汚泥は57kgまで減少する。ここでは揮発性脂肪酸濃度を5.1g/l と仮定したが、pH の制御等によりさらに濃度を上げることは可能である。好気醗酵に使用し得る微生物は、基質が2種あるいはそれ以上ということで、混合培養なども良い結果をもたらすと考えられる。表1から明らかなように、消化槽の保温が良好な場合、消化槽表面からの放散によるエネルギーは、汚泥の予熱に必要なエネルギーに比べ極めて少ない。

ここでは、下水汚泥からのガス発生量は、古

屋ら²⁾のデータを用いたが、著者が昭和45年の公共下水道統計より11処理場について計算した添加汚泥V S当たりのガス発生量は、155ml/g V S から723ml/g V S までばらついていた。平均は370ml/g V S で、表1で用いた値より低かった。実際の消化槽では砂の堆積により消化槽実容積が低下したり、スカムの発生などで消化槽が充分機能せず、低い値になったと推測される。しかし、ガス発生量の極めて良い処理場もあり、注意深く管理すれば、ガス発生量は改善されることが示唆される。

本システムは、一つの方向を示したもので、細かい点、例えば投入汚泥の濃度、消化汚泥の脱水性、汚泥中の重金属の SCP への影響など実施までには検討すべき課題は多い。

3. 農業廃棄物の再資源化

家畜ふん尿や作物残渣のような農業廃棄物による汚染も、狭小な我が国にとっては大きな問題である。しかし、これらも水分調整を行えば、汚泥として取り扱うことができ、処理を兼ねて再資源化が可能である。

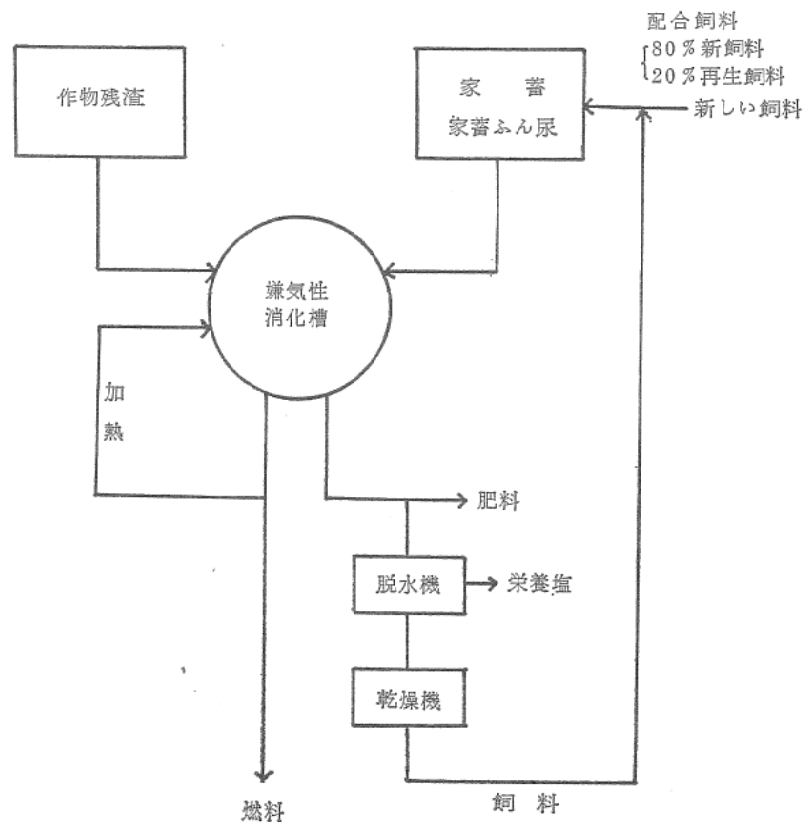


図2 家畜ふん尿の処理・再資源化システム案

表2 豚ふん尿とコーンストーパー混合消化における炭素ならびに窒素収支

| 成分 | 基質 | 豚ふん尿 + コーンストーパー | 豚ふん尿 + コーンストーパー | 豚ふん尿 | 乳用牛 ふん尿 ^{*1} |
|---------------------------|----|-----------------------|-----------------------|------|--------------------------|
| | | 55°C | 39°C | 39°C | 39°C |
| 滞留時間 | | 8日 | 16日 | 16日 | 14日 |
| 消化前：固形物含量 | | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 揮発性固形物 | | 76.8 | 76.8 | 71.4 | 88.5 |
| 炭素量 | | 31.9 | 31.9 | 30.9 | 29.2 |
| 窒素量 | | 3.4 | 3.4 | 4.2 | 2.6 |
| 消化後：固形物含量 | | 56.3 | 58.7 | 66.8 | 51 |
| biomass量 | | 21.3 | 22.0 | 21.5 | 6 |
| 残存固形物量 ^{*2} | | 35.0 | 36.7 | 45.3 | 45 |
| 利用固形物量 | | 65.0 | 63.3 | 54.7 | 55 |
| 炭素バランス：CH ₄ | | 7.0 | 8.4 | 6.3 | 6.4 |
| CO ₂ | | 4.1 | 4.1 | 3.8 | 4.3 |
| 揮発性脂肪酸 | | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 1.0 |
| 重炭酸塩 | | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 2.0 |
| biomass量 | | 10.7 | 11.0 | 10.7 | 3.5 |
| C利用率(%) | | 70 | 76 | 70 | 60 |
| 窒素バランス：NH ₄ -N | | 1.2 | 1.2 | 1.8 | 1.6 |
| 溶解性TKN | | 1.3 | 1.2 | 1.8 | 1.6 |
| 不溶性TKN | | 1.7 | 1.8 | 1.7 | 0.6 |
| N利用率(%) | | 12 | 12 | 17 | 15 |

*1 文献4

*2 固形物含量と biomass 量の差

図1に示す方法により再資源化し得るが、ここでは、図2に示す嫌気性消化法を応用した再資源化システムに基づいて、農業廃棄物による汚染防止とともに、蛋白資源・エネルギーの回収を試みた。家畜ふん尿として豚ふん尿（6%汚泥）を作物残渣としてコーンストーパー（2%、とうもろこしの葉・茎）を用い、高温消化と中温消化の比較を行った。高温消化（55°C、滞留時間8日）と中温消化（39°C、滞留時間16日）における炭素と窒素の物質収支を取ると表2のようになる³⁾。参考のため豚ふん尿単独および乳用牛ふん尿⁴⁾の例をあわせて載せた。嫌気性消化により、いずれの場合も全炭素量の33~39%がガス化され、また乳用牛ふん尿を除き、これとほぼ同程度の炭素が biomass として固定される。消化汚泥中には、メタン菌の持つ抗菌力により病原菌などは含まれておらず、乾燥後飼料として使うことができる。小規模ではあるが、醸酵飼料として使われている例もみ

られる。

ここでペプシン・セルラーゼ法⁵⁾による減少乾物量 (Dry Matter Disappearance) を測定し、この値から羊による消化性を Terry et al⁶⁾の相関式を基に推定した。これを一括して表3に示す。DMD 値はコーンストーパーや大麦のストローと同程度で、消化性の点からは充分飼料として使えることを示している。Hashimoto et al⁷⁾は、肉用牛ふん尿の消化脱水ケーキを配合飼料に最高20%まで混合し、羊による消化性を調べた。未混合の場合、その消化性は72.5%であり、20%混合では68.0%と少し低下するが、充分配合飼料として使用し得ることを報告した。また、この消化脱水ケーキ中のアミノ酸は、大豆粉末中のアミノ酸含量ならびに組成と比べて遜色なく、さらに安全性についても支障ないことを示した。また、このことは図1のシステムから得られる biomass 蛋白質が飼料として使えることを示唆している。

表3 各種試料の減少乾物量の比較

| 試料 | 嫌気性消化 | | 乾物当りの蛋白質含量 (%) | DMD* | in vivo での消化性** |
|--------------------|-------|------|----------------|------|-----------------|
| | 滞留時間 | 温度 | | | |
| コーンストーパー含有豚ふん尿の消化液 | 8日 | 55°C | 18.9 | 36.3 | 55.0 |
| コーンストーパー含有豚ふん尿の消化液 | 16 | 39 | 18.8 | 39.5 | 56.8 |
| 豚ふん尿の消化液 | 16 | 39 | 16.1 | 41.1 | 57.7 |
| コーンストーパー | | | 6.0 | 41.9 | 58.2 |
| 大麦のストロー | | | — | 42.2 | 58.4 |

*減少乾物量(ペプシン・セルラーゼ法)全試料は1mm以下に粉碎 (%)

**Terry et al⁶⁾の相関式から推定(羊を使用) (%)

以上の点から、図2に示すシステムは農業廃棄物の再資源化法として極めて有効であることがわかる。日本ではコーンストーパーの代わりに他の廃物(もみがら、わら等)を利用することが可能である。

4. 経済的考察

下水汚泥の発生量は、昭和55年では70%含水率換算で6,759.94千t⁸⁾と報告され、これは30%石灰を含むので、年間固形物排出量は1,420×10³tとなる。これを図1のシステムで再資源化すれば年間29,540tのbiomassが生産される。ここで下水汚泥のVSは65%と仮定した。もし、biomass生産を行わず余剰エネルギーを期待すれば、年間0.38×10¹²kcalが得られる。下水道の普及と処理の高級化により、汚泥発生量は年々増加するので、汚泥から多量の資源・エネルギーを回収することが可能である。

一方、昭和57年には、家畜ふん尿は年間12,756万t排出されると予想され⁹⁾、これをすべて図2の作物残渣を含まないシステムで処理すれば、年間105×10¹²kcalの余剰エネルギーが回収され、これは石油輸入総量¹⁰⁾の約3%に相当する。さらにこれに作物残渣を家畜ふん尿に対し3対1の割合で混合し、消化すれば年間約170×10¹²kcal(石油輸入総量の約5.7%)まで増加する。同時に多量の嫌気性biomassを回収することができる。

以上の試算は、多くの仮定を含んでいるが、嫌気性消化法を組み込んだ汚泥再資源化法により、多量の資源(biomass等)やエネルギー(メ

タンガス)を回収し得ることが示され、今後の汚泥処理の一方を示唆しているといえる。

5. おわりに

消化槽の運転・管理では、常にできるだけ濃度の高いスラッジを投入することが熱経済の上からも、消化槽のコンパクト化(初期投資の減少)の上からも大切である。さらに消化槽内に砂などの不要物を堆積させないための配慮(消化槽の形やスラッジの引き抜き方法の改善)も欠くことはできない。

その他、生ごみを利用する場合、この破碎も重要な操作となる。多くの技術的問題は残されているが、嫌気性消化法による廃物の再資源化は極めて実現性のある方法といえる。

参考文献

- 1) Ghosh, S., Klass, D.L. : Process Biochemistry, 13, pp. 15-24 (1978).
- 2) 古屋ら: 下水道協会誌, 16 (183), pp. 36-45 (1979).
- 3) Fujita, M., Scharer, J.M. & Moo-Young, M. : Agricultural Wastes-An International Journal, vol. 2, 印刷中 (1980).
- 4) Scharer, J.M., Moo-Young, M. : Advances in Biochemical Eng., 11, pp. 85-101 (1979).
- 5) Goto, I., Minson, D.J. : Animal Feed Science and Technology, 2, pp. 247-253 (1977).
- 6) Terry, R.A., Mundell, D.C. & Osbourn, D.F. : J. the Bri. Grassland Soc., 33, pp. 13-18 (1978).
- 7) Hashimoto, A.G., Prior, R.L. & Chen, Y.R. : The Great Plains Extension Senior on Methane Prod. from Livestock Manure, Liversal, Kansas, Feb. 15 (1978).
- 8) 井前: 下水道協会誌, 16 (183), pp. 2-14 (1979).
- 9) 上原: 公害と対策, 13, pp. 866-869 (1979).
- 10) 信原: エネルギー, 12(8), pp. 28-33(1979).