

## 工場排水の微生物処理

大井 進

## 1. はじめに

我国の現在の経済発展に重要な役割を果たしてきた、化学工業、製鉄業、製紙工業、機械工業などは多量の水を用いる産業である。「湯水の如く」水を使うのでその大部分は排水（廃水）となり、周辺の河川の汚濁の原因の一つとなった。

古く1831年英国にコレラが流行した。産業革命以降、工業と都市の膨張に伴い工場排水と生活排水による深刻な河川汚染の結果であった。以後、水質汚濁防止のため下水道の整備、河川の改修、関連法案の制定が行われた。テムス河の汚濁防止活動は1860年頃に始まり、1876年、河川汚濁防止法制定、1951年現行のものとなった。約130年の歴史である。

我国では昭和33年（1958年）6月に江戸川で水質汚濁事件がおきて、水質汚濁防止法案が同年の12月に制定された。污水处理は一般的には有害成分の除去、無害化と考えられている。公共に対する被害防止の意味が強い。またその処理技術の開発には多額の投資が必要である。しかし、一部では汚水を貴重な原料源として見直し、未利用資源の有効利用であると考え一種の生産技術として発展している分野もいくつかある。

排水の生物学的処理には2通りあり、1は好気性生物による。廃水へ十分な酸素を供給して、有機物を分解する。2は嫌気性生物を利用して、有機物を分解してメタン、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>Oにする方法である。もともと、河川では汚染物質は微生物の作用を受けて分解、浄化されている。これらは一種の酸化反応で、これに必要な酸素量をppmで示した値がBOD（生物化学的酸素消費量）である。一方、化学的に酸化を行い消費される酸素量を求めたものがCOD（化学的酸素消費量）である。

製糖工場のアルコール発酵の蒸留廃液（slop waste）はCOD50,000~70,000ppmを示す濃厚な廃液である。本稿ではこの廃液のメタン発酵処理（嫌気処理）の概略を説明する。

## 2. アルコール工場排水

アルコール発酵ではグルコース1kgから0.514kgのエタノールと0.4886kgのCO<sub>2</sub>がえられる。製糖工場では砂糖きびより砂糖を製造する際の副産物、廃糖蜜や、さとうきびの搾汁より直接エタノールを製造している。糖蜜1t当り300l、さとうきび1t当り60lのエタノールがとれる。原料に硫酸、過磷酸などを加えpH4.6~4.8、30~34℃で9時間発酵を行い約10%のエタノールを生成

させる。この操作を6か月間も半連続的に継続する。その際、アルコール発酵は発熱反応であるから通常はタンクを冷却しなければならない。近年は40℃前後でも発酵可能な酵母が作られている。また高濃度仕込みの工夫も行われている。エタノール、酸性条件にも耐えて、発酵時間が短く、発酵歩合も良く、うまく回収、再利用できる菌が開発されつつある。もろみ中のエタノールの蒸留（99.6% Vol）にはエタノール生産工程に必要なエネルギーの約50~70%が用いられる。蒸留法は液相のエタノールを加熱によって気相にかえ、ついで冷却によって気相のエタノールを液相にもどすことになる。この工程で排出される廃液 slop waste は液温70~80℃である。

## 3. 糖蜜アルコール発酵廃液のメタン発酵処理

メタン発酵は大別して2通りに分けられる。1は中温（37℃）発酵で完全分解、ガス化に約2週間から1か月が必要である。2は高温（50~60℃）メタン発酵で発酵も迅速でかつ効率も高いものである。また、発酵行程は酸生成、主として醋酸、酪酸を蓄積する過程と、メタンガスを生成する過程とから成立している。著者の研究室で馴養した中温メタンスラッジ中の微生物数を調べたところ、6属16種のクロストリジウム属菌を含む嫌気性菌を確認した。メタンガス生成を行うメタン菌は2種生存していた。総菌数はメタン菌0.48×10<sup>8</sup>ヶ/ml、酸生成菌は0.26×10<sup>8</sup>ヶ/ml、合計0.74×10<sup>8</sup>ヶ/mlであった。典型的な酸生成菌として生デンプンやペクチンを良く分解する *Clostridium butyricum* T-7 菌を分離した。一方、高温メタンスラッジからは酸生成菌として、55℃でキシランに良く作用して生育しうる3株の *Clostridium thermosaccharolyticum* を分離してそれらの分解に関わる酵素キシラナーゼの諸性質を明らかにした。キシランは植物細胞壁においてセルロースと結合して存在する成

表1 実験に用いた Slop waste の分析値

全有機炭素(TOC)	70,000ppm
化学酸素要求量(COD <sub>Mn</sub> )	60,500ppm
無機炭素(IOC)	115ppm
全固形分	11.5%
蒸発残渣量	9.76%
全糖分量	3.45%
全窒素量	0.16%
灰分	2.01%
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.20%
pH	5.1

分、ヘミセルロースの一分で、イネ、トウモロコシの穂軸などに多く含まれている。メタン生成菌としてはギ酸酸化性の高温メタン菌、*Methanobacterium thermoformicum* SF-4 を分離して現在はそのヒドロゲナーゼやトランスアミナーゼなどの諸性質を調べている。

さて、ここで slop waste の分析値（表1）を見ていただきたい。COD<sub>60,500ppm</sub>で pH5.1 と酸性の濃厚な廃液である。表には出ていないが黒褐色の液で、メラノイジンという色素化合物を含んでいる。表2に slop waste のメタン発酵処理の結果の一部をお示した。実験は5 l (内容3.5 l) と25 l の嫌気発酵槽を用いて、37℃と55℃で行った。とくに高温メタンスラッジはタイ国カンベンセンのカセサート大学構内の牛の遊牧場の土から採取したものを馴養したものである。日本国際協力事業団 (JICA) のプロジェクトの一つにメタン発酵がとりあげられて(約10年前)、二、三の若いタイ国の研究者が大阪へ勉強に来て(約1年間)帰国後に行った研究の一部である。また、フィリピンでもフィリピン大学のロスバニオスにある BIOTECH 研究所の若い人達が、ルソン島パタンガスの製糖工場の排水溝や、ネグロス島のラカルロタの製糖工場の排水溝から採取した泥を馴養してよい高温メタンスラッジを作っている。表2のメタンガスはメタン52~68%の含量のものを得ている。例えば、高温(55℃)処理で slop waste 1 l を添加すると3日目に64.8 l のガス発生を示し、COD は14,000ppmから6,050 ppmへ低下した。

フィリピン大学の BIOTECH 研究所ではパタンガスの中規模の製糖工場と共同で、工場廃液のメタン発酵(55℃)処理を行っている。工場動力はメタンガスからの水蒸気でまかなっている。同工場では35~40℃のアルコール発酵を行っている。1日約250 t のさとうきびから

15 kl のアルコールを生産している(この生産規模は蒸留塔の最大径によってきまる)。そして1日に約152 kl の slop waste を排出している。フィリピンではここ4~5年以内に排水の規制をつよめ、河川への放流時のCOD値をまず600ppmとし、ついで150ppmへとしぼり込む様子である。また排水の色は無色にするとのことである。廃液中のメラノイジンは微生物により(寒天分解能を示す細菌やキノコの菌)分解除去が可能であるが、なにぶん大量の排水なので、物理化学的な処理、例えばオゾン酸化なども最終的には入れないといけなく考えられる。微生物処理の1例としては、1.9g細胞/mlの固定化カラムを用いて、pH7.0、48時間処理で最高72%の脱色が可能である。

#### 4. おわりに

我国におけるメタン発酵の研究は1910年頃からはじまり、第2次世界大戦前後は国営のデンプンからアルコールを作る工場で実施されていた。ついで1973年の石油ショックで効率的なメタン発酵が計画され研究された。しかし、現在では大都市の廃棄物処理場や下水処理場ではメタン発酵可能な廃液、廃棄物も最終的には石油を用いて焼却している様子である。

我々の日常生活の中で意外に大量のメタンが発生していたり未利用のまま拡散、地球の温暖化の原因になったりしている。例えば水田からは $2.0 \times 10^{14}$  g/年、炭鉱では $2.0 \times 10^{13}$  g/年と見積られている。我国でメタン発酵の対象となりうる有機物系廃棄物の排出量は年間2億トンに達していて、水分80%を含むものとして、メタン発酵させると約45億 $m^3$ のメタンを発生回収しうるものと試算される。重油換算で $2.25 \times 10^9$  l となり、日本全体の石油輸入量の1~2%に相当するエネルギーをすてることになる。(筆者は大阪市立大学理学部教授)

表2 Slop waste のメタン発酵、中温発酵と高温発酵の比較

発酵	Slop waste 添加量(ml)	ガス発生量(l)				TOC(ppm)		COD(ppm)	
		1	2	3	6(日)	始	終	始	終
中温発酵 (37℃)	30	1.8	2.0	—	—	500	200	500	170
	60	3.6	5.0	—	—	1100	600	1000	370
	125	5.8	7.8	7.9	—	2200	1100	2100	800
	250	11.2	14.6	15.5	—	4600	2300	4200	1670
	500	16.0	23.2	30.0	—	9300	4900	8400	3600
	1000	24.0	36.0	42.0	54.0	19000	10500	14000	6550
高温発酵 (55℃)	30	1.6	2.0	—	—	700	310	600	175
	60	3.3	5.0	—	—	1400	700	1100	370
	125	6.0	7.0	8.0	—	2300	1100	2000	745
	250	11.7	13.5	15.5	—	4800	2500	4500	1560
	500	23.4	30.5	32.5	—	9500	5000	8400	3130
	1000	33.4	54.0	64.8	—	19000	9900	14000	6050
	2000	38.0	62.4	84.0	124.0	38000	19800	28000	12200