

(17) 埋立構造と微生物

福岡大学工学部 ○松 藤 康 司
 花 嶋 正 孝
 山 崎 惟 義

1 はじめに¹⁾

廃棄物の埋立処分技術については、技術開発の遅れが目立ち、多くの自治体で埋立地周辺の住民とのトラブルが多発している。そこで、埋立に伴う環境汚染の軽減を目的として、埋立地に自然界の代謝機能を十分生かせるような機能を持たせ、早期安定化を計ろうとして提唱したのが、『埋立構造』の考え方である。即ち、埋立地は従来のような廃棄物の投棄場だけでなく廃棄物の早期安定化を計る処理場であるという考え方を導入し、埋立地に廃棄物にとっての処理機能を持たせたものが『埋立構造』の考え方である。この埋立構造の導入によって埋立地も以前に比べると分類されやすくなってきており、浄化機能を考えた好氣的な条件下での埋立構造によって埋立に伴う環境汚染の負荷が軽減されることが実証されつつある。特に埋立構造と浸出液の水質については顕著な効果が出ている。

そこで、本論文は埋立構造を体系化する上で、一つの指標になった陸上埋立における埋立地と土壌微生物の関係について述べる。

2 埋立地の変遷と研究経緯²⁾

埋立構造の考え方を提唱するに至った経緯は、我国の埋立地の変遷と既存埋立地における諸問題の中から、埋立地を科学的にとらえなおした事による所が大きい。

我国における埋立処分の歴史は古いが、ゴミ（廃棄物）に本格的に世論が注目するようになったのは、東京における昭和46年の「ゴミ戦争」宣言が発端と言えよう。

それまでは縄文時代の貝塚に代表されるような食べかすを河川敷や海岸等に投棄した所謂ゴミ捨て場の時代が長くつづいていたと考えられる。そして、「衛生観念」が普及した昭和の初期頃には、ゴミの処分方法は、大別して「原形処理法」と「変形処理法」に別けられていた。「原形処理法」とは、①陸上投棄②河海投棄③耕地施肥④肥料⑤動物飼料等であり「変形処理法」とは①化学的処理法②製紙原料③肥料原料④乾留による諸製品原料⑤焼却処理法⑥野天焼却法⑦工場焼却法でこの中でも、投棄と野焼が主体を占めていた。

戦後の混乱期を過ぎ、高度成長期を迎えた頃から廃棄物問題も大きくなり、その処理方法も埋立と焼却が主体を占め、特に昭和40年代半ばまでは、依然として廃棄物総量の中で埋立量が優位を占めていた状況であった。

このように、廃棄物の処理の中で、埋立がかなり重要な位置を占めていたにもかかわらず、昭和30年代までは本格的に埋立地が技術的にとらえられることがなかった。そして、埋立地も単に投棄場か又は、簡単に覆土する衛生埋立で、埋立地内での浄化機能面の評価は殆んど行なわれず、“臭いものには蓋”式の最終処分地として放置されていた。ところが、経済成長と人口の都市集中化が進行し、廃棄物の投棄量と自然の浄化能力とのバランスがくずれ埋立に伴う環境汚染問題が全国で表面化したのが昭和40年代である。

この頃は、埋立地からの浸出液やメタンガス発生が周辺環境を悪化しており、とりわけ浸出液が農業用水、河川水を汚していた。そこでこれら高濃度の汚水をいかに処理するかが中心課題であった。しかし、浸出液は水量・水質の変動が大きく、又、経年的にも変化し、更に、埋立廃棄物の性状も種々雑多なだけに浸出液処理も当時は困難を極めていた。

こうした状況の中で、埋立地に一定の浄化機能を持たせ、水質の浄化と水量・水質の変動とメタンガス発生を制御を目的として取り組んだのが「埋立構造」の研究である。

3 埋立模型槽による埋立実験

埋立地での浄化機能、即ち、埋立地の条件と微生物の役割を解明するための実験に用いた埋立模型槽を図

1に示す。

この各槽に表1に示した組成のゴミを表2に示す条件で充填し、その後15cmの覆土（マサ土）を行なった。本実験は、埋立廃棄物や埋立地の諸条件を考慮に入れて行なったシリーズ実験のうちRun3、Run5の実験結果をまとめたものである。

尚、本実験において、埋立地の処理機能に注目して分類した「埋立構造」の中で、ブローにより槽内に空気を送入する埋立槽を好気性埋立構造、空気送入を行わず浸出液採水時以外は常時底部の集水管を閉じている槽を嫌気性埋立構造とした。

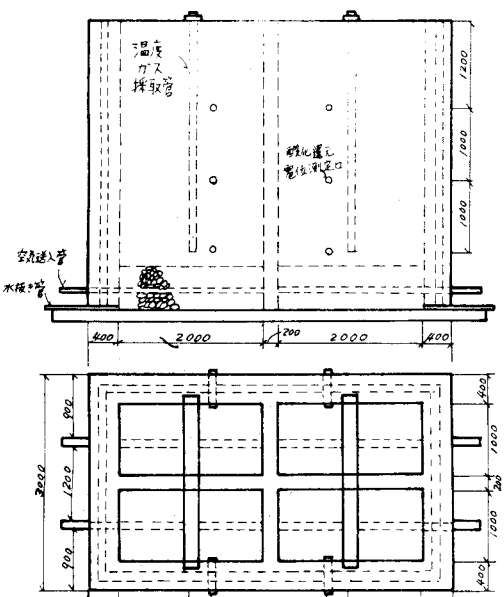
4 安定化傾向と内部変化³⁾

内部変化の指標として、浸出液の水質（BOD）の経時変化をみると、好気性埋立では埋立後3年目で数十ppm、嫌気性埋立で数百ppmである。更に、Run3、Run5によって空気送入力による差をみると、空気送入力 $5\text{ l/m}^2\cdot\text{min}$ と $10\text{ l/m}^2\cdot\text{min}$ の顕著な差はみられず、 $2.5\text{ l/m}^2\cdot\text{min}$ においては、BOD値は若干高い値を示した。一方、嫌気性埋立においては、ゴミの破碎の有無による差よりも、単位体積重量の差による内部間隙の違いが、水質には大きく影響を与えていると考えられる。（図2参照）

次に内部物質変化からみた安定化傾向をみるために、3年目に模型槽を解体し、その内部物質の消失量を計算すると表3のようになる。これからわかるようにRun3、Run5ともに、好気性埋立の方が消失量が大きく、特に消失重量のうち、好気性埋立がガス化率90%以上と浸出液への負荷が小さく、かつ早期に分解していることがわかった。一方、未破碎ゴミに比べ、破碎したゴミの方が、ガス化率が高く、埋立容量も大きくなるなど、破碎埋立の一定の効果もみられた。

表－2 実験槽の条件

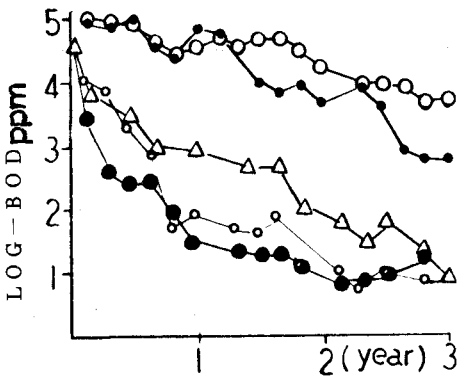
		埋立構造	充填廃棄物の形態	空気吹込み量
Run 3	I 槽	好気性埋立	破碎した生ゴミ	$5\text{ l/m}^2\cdot\text{min}$
	II 槽	好気性埋立	破碎しない生ゴミ	$5\text{ l/m}^2\cdot\text{min}$
	III 槽	好気性埋立	破碎しない生ゴミ	$10\text{ l/m}^2\cdot\text{min}$
	IV 槽	嫌気性埋立	破碎しない生ゴミ	0
Run 5	I 槽	好気性埋立	破碎した生ゴミ	$2.5\text{ l/m}^2\cdot\text{min}$
	II 槽	好気性埋立	破碎した生ゴミ	$5\text{ l/m}^2\cdot\text{min}$
	III 槽	嫌気性埋立	破碎しない生ゴミ	0
	IV 槽	嫌気性埋立	破碎した生ゴミ	0



図－1 廃棄物埋立実験槽

表－1 充填ゴミの組成と充填条件

		厨芥	可燃性 雑芥	不燃性 雑芥	充填量	単位体 積重量
Run 3	I 槽	45.2%	46.1%	8.7%	5.3 t	0.76 t/m^3
	II 槽	32.9%	56.4%	10.7%	5.0 t	0.71 t/m^3
	III 槽	32.9%	56.4%	10.7%	5.0 t	0.71 t/m^3
	IV 槽	32.9%	56.4%	10.7%	5.0 t	0.71 t/m^3
Run 5	I 槽	21.9%	71.0%	4.1%	6.0 t	0.86 t/m^3
	II 槽	24.6%	71.3%	4.1%	6.0 t	0.86 t/m^3
	III 槽	60.4%	37.6%	2.0%	3.6 t	0.51 t/m^3
	IV 槽	24.5%	71.4%	4.1%	5.9 t	0.84 t/m^3



図－2 埋立構造とBOD

△ I 槽 (Run5) ○ II 槽 (Run5)
○ III 槽 (Run5) ● IV 槽 (Run3)

このように、埋立地の安定化の傾向は、第1に埋立構造、特に空気の有無によって大きく左右され、次に同じ構造でも廃棄物の性状や内部の間隙の違いによって分解程度は変化すると考えられる。

5 好気性埋立と微生物^{4),5)}

埋立槽の安定化の傾向は、前述したが、この埋立地の安定化の主要因は埋立層内へ導入される空気量等の差によって生じる埋立内部の土壌微生物の活性程度によると考えられる。そこで、埋立構造の違いによる微生物の関係と役割を把握するために、浸出液の細菌叢について調査した。

5-1 実験方法

ゴミ層中の細菌叢は極めて動的でかつ、お互いに複雑に作用を及ぼし合っていると思われる。従って、浸出液と各槽内の微生物は相関を示すものと考え、浸出液中の菌数と菌の性質を調査した。

実験に用いた被検菌の種類、培地及び培養条件等は表4に示す。

5-2 一般細菌数の経時変化

Run3における各槽からの浸出液の菌数の経時変化を図3に示す。又、Run5における菌数の経時変化を6ヶ月ごとに整理すると、表5のようになり、全体的に好気性埋立が嫌気性埋立に比べて菌数が多いことがわかる。そして、この傾向は埋立初期に著しく、埋立初期における好気性埋立と嫌気性埋立の菌数を比較すると、約3オーダーの菌数の差が認められた。しかし、この傾向は廃棄物の分解が進行するに伴ない、経時的には差は小さくなり、埋立後2年目頃には、菌数差は半オーダーとなり、更に2年半頃には好気性埋立と嫌気

表-3 3年間の内部物質変化

内部物質変化 (Run3)

Run 3	I	II	III	IV
ガス化率 (%)	93.9	88.7	92.0	9.8
流出率 (%)	6.1	11.3	8.0	90.2

内部物質変化 (Run5)

Run 5	I	II	III	IV
ガス化率 (%)	94.1	95.1	66.1	72.1
流出率 (%)	5.9	4.9	33.9	27.9

表-4 被検菌の種類・培地・培養条件

菌 種	培 地	PH	培養条件
一般細菌	普通寒天培地	7.2	37℃ 48hr
好熱性細菌*	普通寒天培地	7.2	37℃ 48hr
嫌気性細菌**	グルコース添加 普通寒天培地	7.2	37℃ 1W
セルロース 分解菌	Dubos 培地	7.5	37℃ 1W

* 80℃ 30分熱処理後植種

** Novy 氏法

他に低濃度栄養細菌用培地として 1/10, 1/100 希釈培地 (普通寒天培地) を用いた。

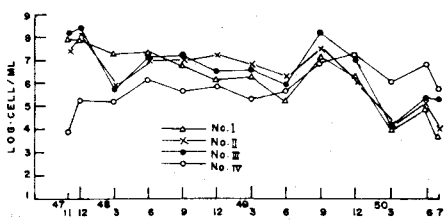


図-3 一般細菌の経時変化 (Run3)

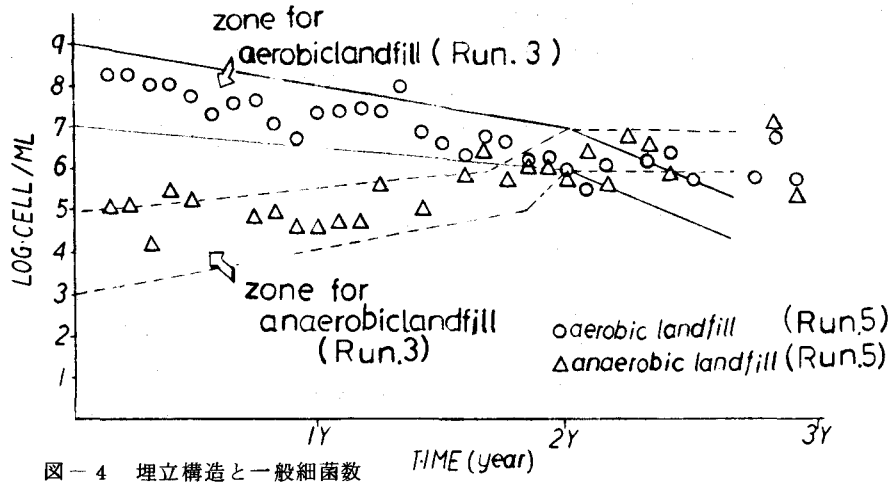


図-4 埋立構造と一般細菌数

性埋立の菌数は逆転した。

次にRun 3の好気性埋立と嫌気性埋立の菌数ゾーンにRun 5のⅡ槽(好気性埋立)とⅣ槽(嫌気性埋立)の菌数の挙動をプロットしたものが図4である。この図に示したように埋立構造によって、菌数の経時変化は類似した挙動を示すことがわかった。

更に具体的にRun 3とRun 5の好気性埋立についてみると、充填廃棄物の性状(破碎の有無)や送入空気量($2.5 \sim 10 \text{ l/m}^3 \cdot \text{min}$)に差があるにもかかわらず、菌数はオーダ的には類似した傾向を示した。一方、嫌気性埋立では、廃棄物の性状(未破碎)が同じであるRun 3Ⅳ槽とRun 5Ⅲ槽よりも、充填廃棄物の充填条件(単位体積重量)の近いRun 3のⅣ槽とRun 5のⅣ槽の方が同じような菌数の挙動を示した。

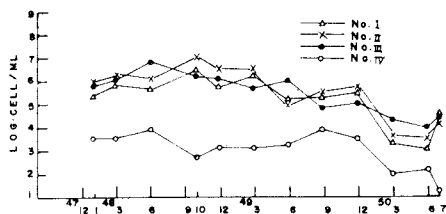
次に、選択培地と菌数との関係を考慮して浸出液中のATP量と菌数の関係を示すと図5のようになり、普通寒天培地による菌数とATPの間には相関がみられ浸出液中の菌数は生物活性の指標になることがわかった。

これらの事より、好気性埋立即ち埋立地に空気が流入することにより、埋立初期に著しく菌数が増加し生物分解が促進されているものと考えられる。又、嫌気性埋立構造であっても、槽内の間隙比の大きい方が、早期に安定化するものと考えられる。

5-3 好熱性細菌の挙動

一般に好気性埋立を行なうと、埋立初期には埋立場内は発酵熱によって70℃程度までになる。こうした埋立地の発酵熱による温度変化に対応する菌として、好熱性細菌(芽胞形成菌)の挙動をみるために80℃30分間熱処理後の菌数を調査した。(図-6 参照)

好熱性細菌に関しても、好気性埋立が嫌気性埋立に比べて、埋立初期3オーダ程度菌数が多く、又、一般細菌数に占める好熱性細菌の割合も、好気性埋立 $1 \sim \frac{1}{100}$ 、嫌気性埋立 $\frac{1}{50} \sim \frac{1}{250}$ と前者の方が好



熱性細菌の占める割合も高い。(表 6 参照)

このことは、好気性埋立の分解過程では、発酵熱のため内部の温度があがり、ある時期から好熱性細菌が主となって分解が進行することを裏付けており、好気性埋立内での好熱性細菌が安定した分解を営んでいると考えられる。

5-4 基質濃度変化と菌数

埋立地は、降雨条件等によって物理的にも化学的にも大きく変化を受けるが、この降雨の変化によって浸出液の水質濃度も大きく変動する。BOD値も降雨量や降雨頻度によっては平常値の 10 培前後の変動が生じる。そこでこうした自然環境の変化、特に降雨等による埋立地内基質濃度の変化による細菌の影響をみる指標として培地濃度の変化に伴う菌数の変化をみた。

まず、 $\frac{1}{10}$ 希釈培地による菌数の変化をみると表 7 のようになり、好気性埋立、嫌気性埋立ともに菌数の変動巾が小さい。同時に、好熱性細菌が基質濃度変化に対して変動を受けにくいことがわかる。

更に、集中豪雨等の前後の基質濃度の変化を想定して $\frac{1}{100}$ 希釈培地で培養すると図 7 に示すように菌数は好気性埋立が $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{10}$ 、嫌気性埋立で $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{200}$ となり、好気性埋立の微生物は嫌気性埋立に比較して、基質濃度の変化を受けにくいことがわかった。このことにより好気性埋立が降雨変動等に対しても安定した状態で分解が進行していると考えられる。

5-5 セルロース分解能

埋立られる廃棄物の中には、セルロース系主体の分解可能物質がゴミ組成の 40% 前後を占めており、廃棄物全体の分解にとって、このセルロース系物質を分解させるか否かは、埋立地の早期安定化にとっても重要

表-7 $\frac{1}{10}$ 希釈培地による菌数の変化* (Run 5)

	Ⅱ 槽		Ⅳ 槽	
	一般	好熱性	一般	好熱性
6ヶ月後	0.32	0.30	0.73	1.59
12ヶ月後	0.34	0.73	0.39	1.61
18ヶ月後	1.40	0.49	0.96	0.86
24ヶ月後	0.60	1.68	1.48	1.05
30ヶ月後	0.75	0.56	0.78	2.66
36ヶ月後	0.62	1.14	1.23	0.73
平均	0.67	0.82	0.93	1.42

* $\frac{1}{10}$ 希釈培地による菌数
普通寒天地 培地による菌数

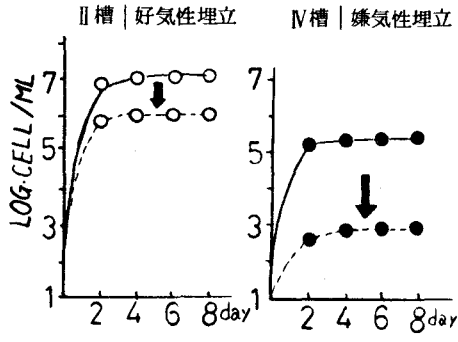


図-7 基質濃度変化と菌数 (Run 5)

—○— } 普通寒天地 - - ○ - - } 100倍希釈
—●— } 普通寒天地 - - ● - - } 普通寒天地培地

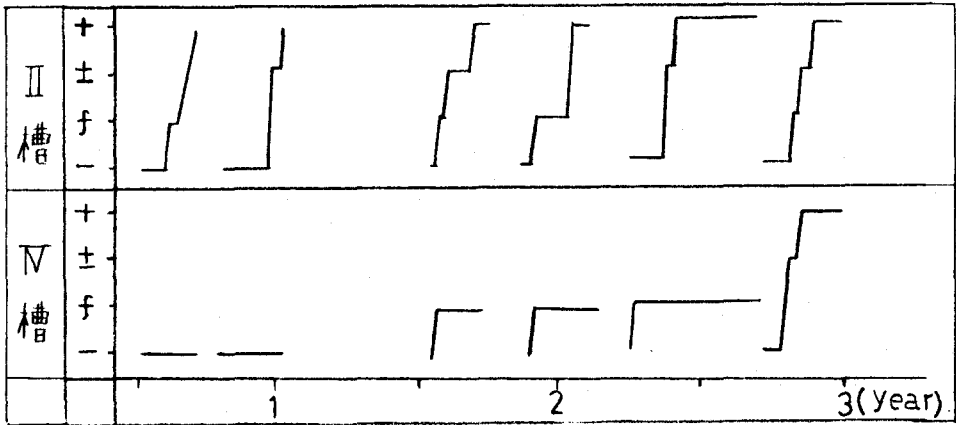


図-8 セルロース分解状況 (Run 5) —○— 紙分解無 ± 紙分解わずか
f 変色又は糸状菌有 + 紙分解明確

である。そこで、次に好気性埋立におけるセルロース分解能について調査した。

セルロース分解菌と総称される中には、細菌、放線菌、糸状菌が含まれているが、セルロース分解菌の特性およびセルラーゼの多様さのため、各々の分解菌を検索する方法は現在のところ、かなり困難である。そこで各槽の浸出液を加え、短冊形のろ紙を浸し、そのろ紙の分解状態でセルロース分解菌の活性程度を定性的に観察した。その分解状況を図示すると図 8 のようになり、好気性埋立が嫌気性埋立に比べて、はるかにセルロース分解能が高い。このことは、好気性埋立の方がより早期に安定化する一つの要因と言えよう。

5-6. 埋立構造と菌数及び嫌気性菌

前述したように、埋立構造の違いによって菌の挙動と安定化の速度が著しく異なる。

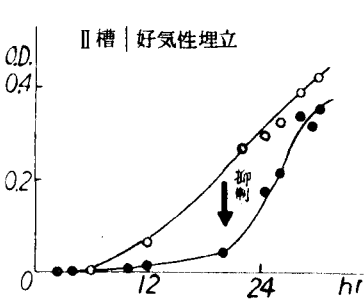
そこで、次に好気性埋立構造と嫌気性埋立構造が菌数に及ぼす影響を埋立初期から 1 年間調査した。

表 8 に示すように、いずれの菌も好気性埋立の方が、菌数が多く、一般細菌は 3~3000 培、好熱性細菌は 5~300 培、嫌気性菌は 6~200 培であった。この傾向は、特に水質の急激な浄化がみられる埋立初期に顕著であった。この様に好気性埋立構造をとることによって、好気性菌だけでなく嫌気性菌も菌数的に 200 倍近い増殖が可能な環境になり、好気性菌、嫌気性菌の両面からの分解を受けるということが埋立地が、早期に安定化していく上で重要な

表-8 埋立構造と菌数及び An 比 (Run 3)

年月	Ⅱ槽 (好気性埋立)				Ⅳ槽 (嫌気性埋立)				Ⅱ槽 / Ⅳ槽		
	一般細菌	好熱性細菌	嫌気性菌	An 比	一般細菌	好熱性細菌	嫌気性菌	An 比	一般細菌	好熱性細菌	嫌気性菌
47/11	2600	—	8	0.3	0.8	—	0.04	4.6	3250	—	200
48/2	7750	60	15	0.2	25	—	2.6	9.6	310	—	6
4	8000	—	59	0.7	—	—	—	—	—	—	—
5	3500	320	27	0.8	490	24	2.2	0.6	7	13	12
5	1470	—	25	1.6	100	—	3.8	3.7	15	—	7
5	870	130	44	4.8	190	27	0.3	0.2	5	5	147
6	750	300	43	5.4	250	1.0	1.7	0.7	3	300	25
6	3700	200	34	0.9	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	5.3	0.6	0.2	3.6	—	—	—

これに対して、嫌気性埋立構造によって埋立地の分解が著しく遅れるが、これは嫌気性埋立によって埋立初期に表 9 に示すようなカルボキシル基を有する代謝産物が溶出し、埋立地が所



$$\text{An 比} = \frac{\text{嫌気性菌数}}{\text{一般細菌数} + \text{嫌気性菌数}} \times 100$$

単位 (× 10⁴ 個 / ml)

表-9 嫌気性埋立浸出液におけるエーテル抽出物の性状 (Run 3)

	沸点 °C	ml	溶解性		定性反応		紫外吸収 mμ	
			H ₂ O	Alcohol	-CHO	-C=O	220	280
A	80	0.8	+	+	+	+	+	—
	97	0.4	+	+	+	+	+	—
B	184 ~ 188	2.8	—	+	+	+	+	+
	193 ~ 200	5.6	—	+	+	+	+	+
	200 ~ 207	12.1	—	+	+	+	+	+
残留物		5.8						

• Ether 抽出物 28ml を常圧で分留した。

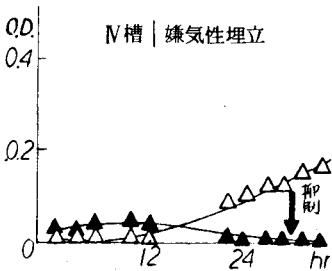


図-9 エーテル抽出物添加による菌の増殖抑制 (Run 3)

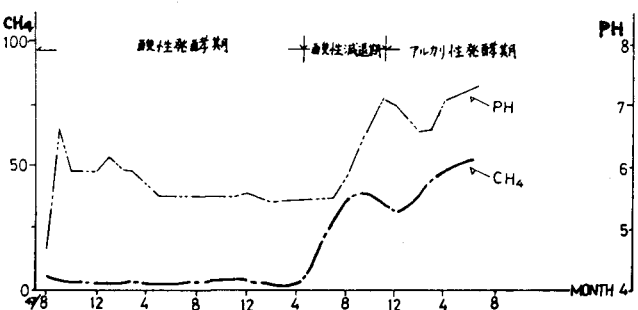


図-10 嫌気性埋立Ⅳ槽とPHとメタンガス発生の関係 (Run 3)

謂「酢づけ状態」になり、微生物の増殖抑制（図9参照）によって、生物分解が二次的に抑制を受け、埋立地の安定化を阻害していることが分った。

5-7 結 論

好気性埋立による微生物の挙動と役割について述べたが、以上をまとめると次のようになる。

①好気性埋立は嫌気性埋立に比べ、菌の絶対数が多かった。特に分解が急激に進行した埋立初期は、好気性埋立の菌数が3オーダーも多かった。

②好気性埋立では、好熱性細菌の割合が多く槽内の発酵熱による温度変化にも耐性があり安定した分解を持続していると考えられる。

③好気性埋立では、基質濃度の変化（ $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{100}$ 希釈培地）にも影響を受けにくく、降雨条件等の自然環境の変化の下でも安定した生物分解が持続されることが考えられる。

④好気性埋立では、セルロース分解能が大である。

⑤好気性埋立においてゴミの分解が進み、槽内が安定化するに従って菌数も減少し、生物学的にも安定化する傾向を示した。

⑥嫌気性埋立によってゴミ槽内は、一種の酢づけ状態になり、微生物抑制が生じ安定化が遅れると考えられる。

以上の事から、埋立地内に空気が存在することは、早期安定化にとって重要な役割を果たしており、好気性埋立とは好気的条件下において、微生物活性を高め、同時に自然環境の変化に対し、変動を受けにくい菌叢をかもしだし、埋立地における安定した生物分解能を促進し、埋立地の早期安定化をはかる埋立構造であると結論した。

6) 6 早期安定化のための埋立構造

前章で、好気性埋立における微生物の役割について述べたが、これらの結果を踏えて、早期安定化のための埋立構造を考えた。

好気性埋立は、埋立初期に一時的に酸性発酵期があるものの、空気送入後、直ちに中性からアルカリ性発酵期に入り、嫌気性発酵の結果、産出する低級脂肪酸も少なく微生物抑制を殆んど受けずに分解が進行する。しかし嫌気性埋立は、一般に下水における汚泥の消化同様、酸性発酵期→酸性減退期→アルカリ性発酵期の過程を経て分解が進行する。

そして、この分解過程は極めて緩慢である。この様子は、図10に示すガス発生とPHの関係をみても良く理解できよう。しかも、酸性発酵期で産出した低級脂肪酸は、前章に述べたように生物分解を阻害し、埋立場の安定化を著しく遅らせることにもなる。こうした点を考慮し、埋立場の早期安定化を考えると、好気性埋立がより有効であり、安定化速度からみても、埋立によって生じる二次汚染防止にとっても効果があると言えよう。

又、好気性埋立の経済性と技術的簡便さを考慮して開発した埋立構造、即ち浸出液排除のための集水装置をゴミ槽内への空気自然流入用の通気管として利用できるように改良した準好気性埋立構造は早期安定化をめざした現実的な埋立構造として、又、埋立地に微生物の役割を工学的に応用した埋立構造として、生物学的見知からも納得できるものであろう。この準好気性埋立構造と菌数の関係も表10に示すように菌数レベルとその活性程度が徐々に明らかにされており、廃棄物埋立地の早期安定化に対する生物学的アプローチという点からも更に、この準好気性埋立の具体的なメカニズムの解明は重要な課題である。

表10 埋立構造と菌数の比較
(準好気性埋立/嫌気性埋立)

菌 種	埋 立 1ヶ月後	埋 立 2ヶ月後	埋 立 6ヶ月後	埋 立 12ヶ月後
一 般 細 菌	1200	560	2000	8600
好熱性細菌	60	526	75	3.5

注：準好気性埋立の埋立12ヶ月後の一般細菌数は $10^6 \sim 7$ 個/ml、好熱性菌数は 10^{3-4} 個/mlである。

<謝 辞>

本論文は、昭和54年文部省科学研究費による研究の一部である。

<参考文献>

- 1) 花嶋他：「山間埋立による諸問題」
生活と環境 Vol.20.No. 7.9 1975
- 2) 栗原：「ゴミ学百科全書」
都市と廃棄物 Vol. 6. No. 2 1976
- 3) 長野他：「廃棄物と好気性埋立(2)」
第34回土木学会全国大会講演集
- 4) 花嶋他：「廃棄物埋立における生物学的アプローチ」
土と微生物 No. 19. 1977
- 5) 松藤他：「廃棄物と微生物(1)」
第32回土木学会全国大会講演集
- 6) 松藤他：「廃棄物と準好気性埋立構造(1)」
第33回土木学会全国大会講演集