

(16) 都市ごみの好気性分解に関する研究(1)

—ごみ性状、操作条件の影響—

STUDY ON AEROBIC DECOMPOSITION OF MUNICIPAL SOLID WASTE
(PART 1)—EFFECT OF REFUSE CHARACTERISTICS AND LANDFILL
OPERATION

○ 神山 桂一※ 田中 信寿※ 井上 雄三※

Keiichi KOYAMA*, Nobutoshi TANAKA*, Yuzo INOUE*

ABSTRACT;The effect of some factors, which are important to design an aerobic sanitary landfill, on aerobic decomposition of artificially made refuse—typical in this nation—in laboratory scale, continuously air-forced static piled layer was experimentally discussed. In order to estimate the effect, temperature inside the layer and gas concentration of exhaust, etc. were measured for about one month, followed by calculating the total quantity of carbon-dioxide and water evolution, oxygen consumption, the decrease of dry refuse, etc.. Consequently, the variations of temperature and concentration with time have 2 or 3 peaks within about 2 weeks and chief decomposed component seems to be hydrocarbon. The decreased weight of dry refuse attains to 30 - 40% of initial refuse and to 2-4 times more than volatile matter of garbage and the decreased weight of summer-type refuse is different from that of winter-type refuse. Anaerobic duration till start of aerating less than 2 days has little effect on decomposition. Too high and too low piled density of the layer give worse decomposition. Even refuse with such low garbage content as 12% can give steady decomposition. Plastic in refuse, especially film results in worse decomposition. For the purpose of energy saving and speedy decomposition, 1 mol oxygen/d/kg of dry initial refuse, or 110 l air/d/kg is appropriate. Moisture content of refuse less than 70% is desired for steady decomposition. These conclusions are also useful to understand the phenomena in composting process or semi-aerobic sanitary landfill.

KEYWORDS;sanitary landfill, aerobic decomposition, composting, oxygen consumption, refuse, disposal

1. はじめに

都市ごみの埋立処分において、浸出水の汚濁負荷を軽減し、腐敗性有機物の早期分解ができるという利点から、好気性埋立^{1,2)}あるいは準好気性埋立方式³⁾が注目され、国内でも新設埋立地で採用するところが増えてきた。一方で、廃棄物資源化の一つとして、ちゅう芥主体の都市ごみ堆肥化(特に高速たい肥化)が見直され、実用化もふえようとしている^{4,5,6)}。これら二つの都市ごみ処理・処分方法においては、都市ごみ中の有機物が好気性微生物による分解作用をうけている点が全く同じである。

筆者らは、好気性埋立や高速たい肥化におけるごみの分解が効率よく行なわれるように計画・設計するための条件を設定するために、都市ごみ中の有機物が好氣的に分解、安定化してゆく過程を明らかにする必要があると考え、ここ数年にわたり基礎的な研究を行ってきた。未だ問題とすべき点は残されているが、本論文ではごみの分解速度に影響を及ぼすと考えられる諸因子についてまとめて考察した。

研究の主目的を好気性埋立の合理的設計におき、ごみがたい積された状態で下部から空気の供給を受けて分解がすすむ様子を模擬できるように考え実験を行なったため、高速たい肥化で行なわれているような切返しの効果は調べていない。また、好氣的なごみの分解に伴って生ずる浸出水の水質変化については、既に幾つかの研究報告^{1,2)}が出されており、われわれもほぼ同様な結果⁷⁾を得たのでここでは省略する。

※ 北海道大学工学部衛生工学科 : Department of Sanitary Engineering, Hokkaido Univ.

2. 実験方法

2.1 人工ごみの性状

廃棄物組成の再現性を計るために、前もって定められた組成の人工ごみを作成し、実験に用いた。実験の時期によって入手困難な材料があるので、以下で夏ごみ、冬ごみという2種類のごみ組成を設定した。この人工ごみの組成決定に際しては、日本の一般家庭から排出される混合ごみを代表できるものとし、又、腐敗・分解に対して不活性なプラスチック、ガラス、陶磁器、金属を含まないごみとした。なお、土砂を微生物の植種源として加えた。この前提に立って岩井等⁸⁾の推算した1970年の全国平均ごみ組成に含水率を加味した値と札幌市の昭和51年の平均値を参考にして、紙類、繊維類、木竹、植物性ちゅう芥、動物性ちゅう芥、土砂の混合割合を定めた。ただし、これでは窒素分の不足が感じられたので動物性ちゅう芥を前述の50%増とした。なお、土砂としては北大農場の土を用いた。表1.1 人工ごみの組成(湿重量%)

次に各々の組成を構成する成分は紙・パルプ年報、家計調査年報、日本食品成分表、工業統計を利用して全国の生産量、消費量、廃棄率などから純廃棄量を算出し、産業廃棄物としてまとめて排出される量を差引き、一般廃棄物として処理される一人一日当りの量を求め、それらの比率を各成分ごとに求め、表1.1のように定めた。

ごみの大きさはちゅう芥は1~2cmの大きさに、その他のものは3~5cmに切断した。表1.1のごみの含水率は冬ごみで約40%、夏ごみで約45%でありこれに水道水を加えて必要な含水率に調整した。又、人工ごみとそのちゅう芥部分の化学的性状は表1.2のとおりである。

2.2 実験装置と方法

実験装置を模式的に図1に示す。ごみ封入用の塩ビ製カラムは内径25cm、長さ50cmの大きさを持ち、これに通常32cmの厚さにごみをたい積させた。この場合、ごみ容量は15.7 lとなる。

通気ガスは流量を測定(ロタメータ型流量計で読取り後、温度、圧力を補正)した後、加湿器で加湿し、カラム内に送入した。カラム内底部にも水を入れ、加湿を確実にしている。ガスは空気吹込み板(25mm正格子状に9mm²の孔がある)から、ごみ層へ入る。排気ガスは冷却器を通し、排気に伴う水分を凝縮水として捕集し、さらに冷却後も排出される水分は塩化カルシウム管で吸着捕集して、これらを随時計量した。排ガス中のNH₃はホウ酸液を入れた吸収ビンで捕集し、凝縮水と合せて分析した。同時にこの液中のTOC濃度も分析した。カラム内温度はごみ層上部から15~20cm深さのカラム中心軸上で、また、排ガス温度はカラム上部の空間温度として検出し、自動記録した。カラム内の気圧、及びごみ層前後での送気の圧力損失は水柱マンメータにより測定した。

ガス中のCO₂、O₂、N₂濃度は、カラム上部排気口において、マイクロシリンジで直接採取し(流入ガスが空気でない時は入口側でもサンプリング)、TCDガスクロマトグラフにより分析した。室内空気の組成も同様に分析した。

ごみは、上下のごみ充てん密度を均一にするため、4等分し、質量を測定しながらカラムに充てんした。なお、ごみは各成分を混合

組成	品名	夏ごみ	冬ごみ
植物性 ちゅう芥	キャベツ	5.64	3.57
	にんじん	3.10	1.97
	白菜	1.92	1.22
	ねぎ	1.85	1.17
	大根	1.83	1.16
	なす	1.56	0.99
	トマト	1.15	0.72
	かぼちゃ	1.06	0.67
	ごぼう	1.04	0.66
	ピーマン	0.74	0.47
	すいか*	9.33	—
	バナナ	4.30	2.46
	夏みかん	3.02	—
	なし	2.01	0.75
	りんご	1.36	2.88
	みかん*	—	21.38
	かき	—	0.51
	(小計)	(40.50)	(40.50)
動物性 ちゅう芥	ほっけ	6.72	—
	しじみ	1.16	左に 同じ
	塩はけ	0.95	—
	鶏卵(から)	1.68	—
	(小計)	(10.50)	—
紙類	新聞紙	4.70	—
	雑誌	2.35	—
	小袋	4.86	—
	ティッシュペーパー	2.45	—
	コンピュター紙	4.91	—
	段ボール	8.15	—
	白紙	8.19	—
	(小計)	(35.60)	—
繊維類	紙織物	2.75	—
	毛織物	1.21	—
	麻織物	0.04	—
	人絹織物	0.96	—
	合成繊維織物	1.45	—
	(小計)	(6.70)	—
木炭類	炭	1.90	—
	わりばし	1.90	—
	(小計)	(3.80)	—
土	農場の土	2.90	—

* すいか、みかんについては100%含水率を假定して、用いる。他に含水率0.8%を含む。

表1.2 人工ごみの性状(平均値)

	夏ごみ	冬ごみ	夏ごみ	冬ごみ
	ちゅう芥	ちゅう芥	ちゅう芥	ちゅう芥
乾燥減率(%)	88.5	61.1	91.1	67.6
炭素計(%)	41	44	43	34
炭素計(%)	1.2	2.9	1.2	3.0
リン計(%)	—	1.5	—	1.3
含水率(%)	—	84.2	—	78.3

含水率以外は乾燥状態に換算した重量%。

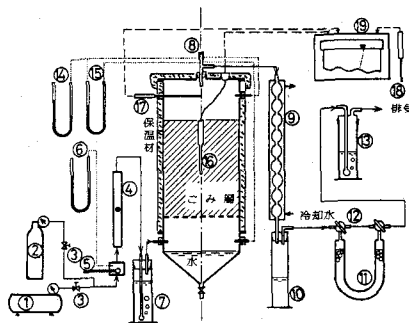


図1 実験装置図

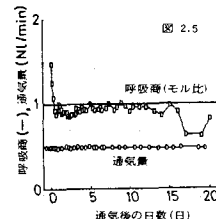
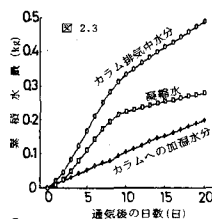
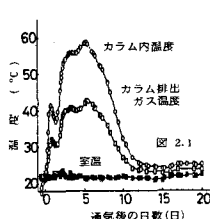
- 1 送気用エアコンプレッサー
- 2 密着ポンプ
- 3 流量測定用ニードルバルブ
- 4 流量計(ロタメータ型)
- 5 流量補正用温度計
- 6 流量補正用圧力計(水柱マンメータ)
- 7 加湿器(液面採取用目盛付)
- 8 排ガスガス組成用サンプル孔
- 9 排ガス凝縮用冷却器
- 10 凝縮水測定用メスシリンダー
- 11 凝縮後排ガス中水分吸着用塩化カルシウム管
- 12 切替え三カコック
- 13 アンモニア吸収器(飽和ホウ酸液)
- 14 カラム内圧計(水マンメータ)
- 15 ごみ層の圧力損失計(水マンメータ)
- 16 カラム内(ごみ層)温度計(白金抵抗式)
- 17 排気ガス温度計(白金抵抗式)
- 18 室温計(白金抵抗式)
- 19 自動打点記録計

し、充てんした後、約12時間後に通気を開始することを目安とした。ごみ投入時に、混合したごみ約500gをとり、含水率等を測定した。実験終了時にもごみ質量を測定した。この時は充てんしたごみ全量をよく混合し、4分法をくりかえして約500gのサンプルをとり、含水率等の分析を行なった。またカラム下部の水の増加量も実測した。なお、実験装置は20～23℃に気温を制御した室内に置いた。

以上が実験の標準の手順である。実験は3年間にまたがっており、1年目の実験では流入空気のは加湿は行なわず、そのかわりカラム排気中の水分(凝縮水)をカラムへ戻した。また、水量の測定、アンモニアの測定を行っていない。

2.3 実験の内容

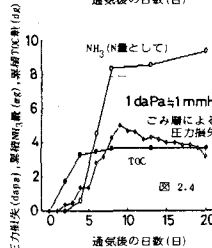
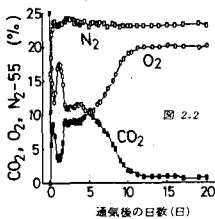
実験の条件を表2に示す。実験は目的とする実験因子のみを変化させた4～6本のカラムを並列して行なった。



3. 実験結果と考察

3.1 実験結果の特徴

実験結果の一例を図2に示す。図2.1はカラム内温度、排ガス温度、室温の経時変化である。温度とCO₂濃度の経時変化をみると、通気後、1日弱で生ずる小さなピーク(初期の分解期)と3～7日にわたって生ずる主要なピークとが認められる。初期の分解期におけるカラム内最高温度が40～45℃であることから、これは中温領域(20℃～40℃において最適、40～45℃が最高温度といわれる^{9,10})において活性をもつ中温菌による分解作用のため、このことは、カラム内温度が中温菌の最適温度である40℃を越えると、CO₂量が減少していることから分る。このように中温菌の活動が阻害され、カラム内温度が一たん降下する一方で、高温領域(50℃～60℃において最適、70～80℃が最高温度といわれる^{9,10})において活性をもつ高温菌の活動が活発になり再び、O₂吸収量の増加、温度の上昇



実験条件 No. S56R3C3
通気量 0.49 L/min (空気)
充てん後、0.30日後に通気開始
カラム温度計位置: ごみ上面から19.4cm
冬ごみ(表1の組成のもの)
通気日数: 20.1日
カラム下部の水増量=75ml

	初期値	終了値
ごみ充てん量(kg)	6.80	6.05
含水率(%)	56.6	63.6
揮発性固形物(%)	92.7	88.5
C(%)	44.0	40.1
N(%)	1.2	1.3
ごみ厚さ(cm)	32	31.1

図2 実験結果(経時変化)の例

表2 実験条件表

るカラム内最高温度が40～45℃であることから、これは中温領域(20℃～40℃において最適、40～45℃が最高温度といわれる^{9,10})において活性をもつ中温菌による分解作用のため、このことは、カラム内温度が中温菌の最適温度である40℃を越えると、CO₂量が減少していることから分る。このように中温菌の活動が阻害され、カラム内温度が一たん降下する一方で、高温領域(50℃～60℃において最適、70～80℃が最高温度といわれる^{9,10})において活性をもつ高温菌の活動が活発になり再び、O₂吸収量の増加、温度の上昇

(注)

- *1 最初の2週間(31日)に1.0 L/min通気を停止、以後、5 L/minに1.0 L/min通気停止。
- *2 30日後は空気のみ通気。
- *3 21日
- *4 16日
- *5 ごみ厚のばらつき40cm、他の実験では32cm。
- *6 24日後は、それまでの空気通気量で空気のみ通気。
- *7 プラスチックス6.3%投入(経緯は*10と同じ)
- *8 糞尿のごみのちゅう芥比率は表1参照。
- *9 充てん密度の単位はkg/L。
- *10 加えた水道水も含めて(加えたちゅう芥とその他のごみ+水道水)中のちゅう芥比率として示した。
- *11 ()内は充てん後の経過日数。
- *12 一時、通気ストップ。

S56R3シリーズの実験フローは図1と異なる。(カラム下部に水を入れ、排ガス中の凝縮水を装置内にもどす。)

実験番号	通気(実験)日数(日)	通気量(NL/min)	通気の種類	ごみの種類	初期充てん量(kg)	初期含水率(%)	実験因子
S54R1C1*12	23	0.5	空気	冬ごみ	6.28	46.3	初期含水率
2	*	*	*	*	7.54	55.1	
3	*	*	*	*	8.38	60.8	
4	*	*	*	*	11.28	70.9	
5	*	*	*	*	12.28	71.2	
6	*	*	*	*	14.28	78.7	
S54R2C1	42	0.5	空気	冬ごみ	11.23	70.3	1次分解後の混合きりかえし + 初期通気停止
3*1	38	0.5	*	*	6.74	50.2	
4	40	0.05	*	*	*	*	
5	*	0.15	*	*	*	*	
6	*	0.30	*	*	*	*	
S55R1C1*2	50	0.3	空気(N ₂ とN ₂ (7日)) 空気(21日)とN ₂ (51日)	夏ごみ	7.60	63.0	通気量
2*3	*	*	空気	*	*	*	
3	*	*	空気	*	*	*	
4*4	*	*	空気(21日)とN ₂ (21日)	*	*	*	
5	*	*	空気	*	*	*	
S55R2C1*5	11.9	0.30	空気	冬ごみ	10.00	56.6	温度・ガス組成の分析
S55R3C1	34	0.48	空気(O ₂ 21.0%)	冬ごみ	6.80	50.8	
2*6	*	0.50	空気+N ₂ (O ₂ 9.3%)	*	*	*	
3*6	*	0.51	O ₂ 6.6%)	*	*	*	
4*6	*	0.49	O ₂ 3.5%)	*	*	*	
5*6	*	0.50	O ₂ 2.2%)	*	*	*	
S56R1C1	29.0	0.48	空気	夏ごみ	2.01(0.13kg/L)	45.1	通気中の入口酸素濃度
2	*	0.47	*	*	3.78(0.24 *)	*	
3	*	0.49	*	*	5.00(0.32 *)	*	
4	*	*	*	*	6.50(0.41 *)	*	
5	*	0.48	*	*	8.05(0.51 *)	*	
S56R2C1*7	23.0	0.48	空気	冬ごみ(33.8%)	6.80	52.9	プラスチック投入
2	*	0.47	*	冬ごみ(11.5%)	*	52.1	
3	*	0.49	*	(21.0%)	*	53.9	
4	*	*	*	(38.7%)	*	54.3	
5	*	0.47	*	(52.1%)	*	53.0	
S56R3C1	18.1(7.28日)	0.48	空気	冬ごみ	6.80	56.6	けん酸の分解日数、()内は酸日数
2	19.1(11.82)	*	*	*	*	*	
3	20.1(0.80)	0.49	*	*	*	*	
4	20.7(0.10)	*	*	*	*	*	

が始まる。この実験では約65℃で温度上昇が止り、CO₂濃度の低下が始まるが、これは、ごみ層中の利用され易い基質が少なくなることにより生ずると思われる。(この時期までを1次分解という。)このような2峰性の経時変化は Clarkら¹¹⁾によっても観測されている。この1次分解は通常12～14日で終了するが、さらに通気を続けると、通常、少量のCO₂発生を示す期間が長く続く。(これを2次分解という。)本研究では、主に多量の酸素消費を行なう1次分解を論ずることとする。

図2.2に排出ガスの濃度変化を示した。実験開始前はガス通気をしていないので、ごみ層内のO₂は消費されており、CO₂が多くなっている。通気開始後、しばらくして(滞留時間の2～3倍)CO₂濃度は低下し、O₂濃度の減少量(O₂はごみ表面に吸収され、微生物により消費される。以下ではO₂吸収量という。)とCO₂濃度の増加量がほぼ同じ変化を示す。N₂濃度の変動はほとんどない。

図2.1、2.2から分るように、CO₂発生量、O₂吸収量、カラム内温度はほとんど同形の経時変化を示しており、実験結果を評価する指標としては等価であると考えられる。このことはコンポスト研究においても知られている。¹²⁾

送気と共にカラムへ流出入した水分の累積量を図2.3に示す。加湿器により加湿され、カラムへ流入する水分の流量は一定である。一方、流出速度は排ガス温度に関係するために、分解の最盛時に最も大きくなる。

また、排ガスと共に排出されるNH₃とTOC物質(凝縮水及びアンモニア吸収液によって捕集されるもの)の測定結果を累積量として図2.4に示した。併せて、ごみ層前後の差圧変化(空気吹込板の圧力損失は無視できる)も示した。TOC物質は実験開始当初に、又、NH₃はごみ分解の活発な時に、各々の発生速度が最大となっている。しかし、それらの量はわずかである。図2.5に呼吸商と通気量の経時変化を示した。これらの量は実験期間を通してほぼ一定であることが分る。

3.2 実験結果評価のための予備的考察

3.2.1 ごみ層内の温度、ガス組成分布 前述したように大部分の実験では、ごみ層容積を15.7 l、ごみ層厚さを32cmと大きくしたために、ごみ層内部で温度やガス組成が均一でなく、分布が存在すると考えられるので、実験的にその状況をは握した。その結果を図3に示す。

この実験では特に、ごみ層の厚みを40cm、空気量は0.3Nl/minとしている。図3.1はカラム中心軸(r=0)で測定したごみ層温度の変化を示している。ごみ層底面よりの距離 l=5cmでは全体的に低い温度を示すが、これはカラム下部への放熱が大きいからであり、実験装置固有の問題である。またごみ層上部の l=35cmでは l=15～25cmに比べて温度上昇が遅れている。これは図3.3に示すように、ごみ層内O₂濃度が極めて低い状態をつづけたために温度上昇の遅れが生じたものである。すなわち、ごみ層が要求する酸素要求量に酸素供給量が及ばない時に生ずる現象である。他の実験の条件のように、空気流量が0.5Nl/minと大きい時には、l=5cmを除いて、l=15～35cmではほぼ同じ温度変化を示すと思われる。

また、放熱はカラム側壁からも行なわれるため、半径方向に温度こう配が生ずる。それを図3.2に示す。昇温時にはあまり大きな差はないが、最大で5℃程度の温度差があった。

ごみ層内のO₂濃度分布を図3.3に示す。サンプリングは、送気ガスの流れ方向 l=5、15、25、35cm、さらに各々の位置で半径方向にはr=0、r=6.3cmの合計8点と出口について行なった。l=5cmの位置では半径方向の2点の濃度の違いが大きい、他の位置では、ほぼ同じである。また、酸素はごみ層を流れるにしたがい、個々のごみ表面に吸収され、微生物によってさらに消費され、その濃度を減じていくことが分る。

3.2.2 実験装置の熱収支 実験装置の熱収支は次の式で計算できる。

$$Q_p = Q_t + Q_g + Q_r \tag{1}$$

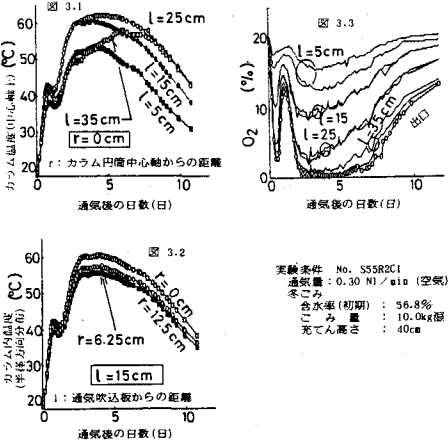


図 3 ごみ層内のガス組成と温度分布

ここで、 Q_t : ごみ層における蓄熱速度
 Q_g : (排気により持ち出される出熱速度) - (通気により持ち込む入熱速度)
 Q_p : 好気性分解による発熱速度
 Q_r : カラムからの放熱速度
 単位はいずれも (kJ/h)

いま、ごみ層の蓄熱速度は、図3に示したようにごみ温度の経時変化がほぼ同じパターンを示すこと、また、以下で示すように、全体の熱収支において蓄熱量の占める比重が小さいことから、ごみ層温度の代表温度としてごみ層内のほぼ中央で測定したカラム内温度 T_c を用いることができ、また、熱容量は式(3)で計算されると仮定すれば、次式が成立する。

$$Q_t = C \frac{dT_c}{dt} \quad (2)$$

T_c : カラム内温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 C : ごみ層の熱容量 ($\frac{\text{kJ}}{^{\circ}\text{C}}$)

$$\text{ここで、 } C = C_r W (1-w) + C_w W \cdot w \quad (3)$$

C_r : 乾ごみの比熱 = $0.33 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ ($1.33 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)

C_w : 水の比熱 = $1.0 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ ($4.2 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)

W : ごみ量 (kg湿)

w : 含水率 (-)

また、時間が経過しても C 値はほとんど変化しないと考えて差支えない。*

Q_g は実験装置に出入するガス温度から求まり、またそのガスは相対湿度100%にあたるとしてガス温度とエンタルピーの関係を用いて計算できる。

発熱速度 Q_p は一般に酸素消費速度に比例することが知られており、その比例定数は理論的には 106 kcal/mol O_2

(444 kJ/mol O_2)、実測値としては 110 kcal/mol O_2 (460 kJ/mol O_2) がある¹⁴⁾。ここでは次式により計算した。

$$Q_p = H \Delta O_2 = 444 \Delta O_2 \quad (4)$$

ΔO_2 : ごみ層の酸素吸収量 ($\text{mol O}_2/\text{h}$)

以上のように Q_t 、 Q_g 、 Q_p が求まるから、放熱速度 Q_r を式(1)を用い、二つの実験連から求め、カラム内とカラム外(室内)の温度差($T_c - T_r$)に対してプロットしたのが図4である。

これらの2系列の実験で、延べ10カラムの Q_p 、 Q_t 、 Q_g を異にする実験結果から、 Q_r と($T_c - T_r$)は比例関係にあり、ほぼ同じ比例定数(すなわち放熱特性)であることが分り、その比例定数 UA (総括伝熱係数 U と伝熱面積 A の積)は実験の範囲内で $1.5 \text{ kJ/h}^{\circ}\text{C}$ と求められた。一方ここで用いた保

温材(熱伝導率 $0.167 \text{ kJ/mh}^{\circ}\text{C}$ 、厚さ 0.035 m)から保温材表面の自然対流伝熱係数 $\alpha = 10 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^{\circ}\text{C}$ ($41.9 \text{ kJ/m}^2 \text{ h}^{\circ}\text{C}$)とし、実験装置の側面(表面積 0.5 m^2)からの放熱特性を求めてみると、 $UA = 2.2 \text{ kJ/h}^{\circ}\text{C}$ となり、オーダー的に一致する。

したがって上述したような手順によって本実験装置の熱収支をとることが可能

脚注(*) 実験期間が長くなり、ごみの質変化が大きい場合はこの仮定はなりたたないが、ここでは一次分解の期間を主に取扱っている。

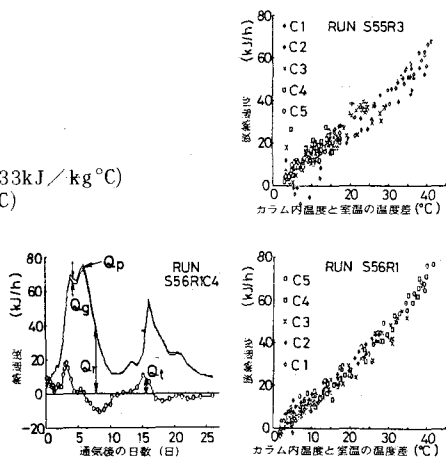


図4 実験装置の熱収支例と放熱特性

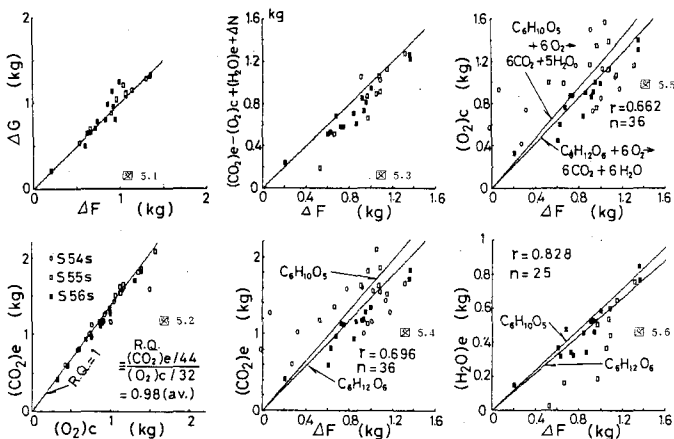


図5 ごみ分解量に関する指標間の関係

であることが分った。図4に熱収支例を示すように式(1)の各項を計算すると、 Q_t 、 Q_g の寄与は極めて小さく、結局、 Q_p と Q_r が釣合う形でカラム内温度が決定されることが分る。

3.2.3 実験評価の指標 ごみの分解量を表すものとして種々の量を測定しているが、それらの間の関係を求め、どれが評価の指標として適当か考察する。測定・分析によって計算でき、この考察の対象とする量は次のものである。

$$\text{ごみの減少質量} \quad \Delta F = F_s^d - F_f^d = F_s^w (1 - w_s) - F_f^w (1 - w_f) \quad (5)$$

$$\text{ごみの減少有機物量} \quad \Delta G = F_s^d (\text{I.L.})_s - F_f^d (\text{I.L.})_f \quad (6)$$

$$\text{ごみの減少窒素量} \quad \Delta N = F_s^d N_s - F_f^d N_f \quad (7)$$

$$\text{CO}_2\text{発生量} \quad (\text{CO}_2)_e = \int_0^T \{ (\text{CO}_2)_o Q_0 - (\text{CO}_2)_i Q_i \} dt = Q_i \int_0^T \{ (\text{CO}_2)_o \frac{(N_2)_i}{(N_2)_o} - (\text{CO}_2)_i \} dt \quad (8)$$

$$\text{O}_2\text{吸収量} \quad (\text{O}_2)_c = Q_i \int_0^T \{ (\text{O}_2)_i - (\text{O}_2)_o \frac{(N_2)_i}{(N_2)_o} \} dt \quad (9)$$

$$\text{H}_2\text{O発生量} \quad (\text{H}_2\text{O})_e = F_f^w w_f - F_s^w w_s + W_o - W_i + \Delta W_c \quad (10)$$

ここで、 W_o : 流出水量(kg), W_i : 流入水量(kg), ΔW_c : カラム下部そう水増量(kg), T : 通気日数(日)
 (I.L.) : ごみの強熱減率(-), Q : 通気流量(mol/d), F : ごみ質量(kg)
 N : 窒素含有率(-), (CO_2) : CO_2 濃度(-), (O_2) : O_2 濃度(-), (N_2) : N_2 濃度(-)

添字 d : 乾状態, w : 湿状態, s : 実験開始時, f : 実験終了時, i : 入口状態, o : 出口状態

これらの指標の関係を図5に示す。図5.1はごみ減少質量 ΔF と減少有機物量 ΔG の関係を示す。ごみは微生物による分解作用を受けているから、 ΔF は ΔG そのものである。両者の値は別々にとったサンプルから得たが、両方の値は比較的良好に一致している。

図5.2は O_2 吸収量 $(\text{O}_2)_c$ と CO_2 発生量 $(\text{CO}_2)_e$ の関係を示す。図中の直線は呼吸商=1を示す。この生物分解反応の呼吸商は1よりわずかに小さい(平均0.98)が、ほぼ1と考えてよく、これは一般に言われるように基質として炭水化物が主に利用されていることに対応している。

次に、ごみ質量の減少 ΔF は、ガス吸収・発生量などの間に次の関係がなければならない。

$$\Delta F = (\text{CO}_2)_e - (\text{O}_2)_c + (\text{H}_2\text{O})_e + \Delta N \quad (11)$$

両辺に実測値を代入して図示すると図5.3のようになり、右辺の方がわずかに小さい。

また、ごみ減量 ΔF と $(\text{CO}_2)_e$ 、 $(\text{O}_2)_c$ 、 $(\text{H}_2\text{O})_e$ 個々の関係を図5.4、5.5、5.6に示す。 ΔN は ΔF の約1%にすぎない。若干のはらつきがみられるが、このはらつきの原因は主としてごみの含水率測定の不正確さに原因して ΔF が不正確になることにあって考えられる。図中の直線は単糖 $\text{C}_6(\text{H}_2\text{O})_6$ 、セルロース $(\text{C}_6(\text{H}_2\text{O})_5)_n$ の分解の場合の関係を示しており、このような化合物に代表される炭水化物の分解に対応していることが分る。梶本ら¹⁵⁾は都市ごみ高速たい肥化実験で分解基質が、 $\text{C}(\text{H}_2\text{O})_{0.8 \sim 0.9}$ の形の炭水化物で表せるとしている。

以下の実験結果の解析ではごみ量当りの各量、 $\Delta F/F_s^d$ 、 $(\text{CO}_2)_e/F_s^d$ 、 $(\text{O}_2)_c/F_s^d$ を示し、総合的にごみ分解効果を評価することにする。

上記の因子は実験(通気)期間にわたって総計された量であるが、実験の評価は同時に速さの面からも評価されねばならない。そのような指標には中温菌及び高温菌の各々によって形成されるカラム内温度や O_2 吸収速度の最大値到達日がある。これらは実験装置の保温性と密接な関係にあるので、より一般的な指標として、ここでは O_2 吸収速度を求めて使うことにした。

ごみ層の O_2 吸収速度は菌体群の O_2 要求量と通気中から菌体群への O_2 移動速度によって決まる。前者は菌体量、温度、含水率、pH、基質量などにより、また、後者は含水率、通気の酸素濃度などにより決まる。ここで用いる O_2 吸収速度は中温菌分解の代表温度として 35°C 、高温菌分解のそれを 50°C とし、それらの温度における値を実測値から内そうして求めた。ただし、いずれも温度上昇時の値を用いたが、この値は温度以外の諸因子の影響も受けている。

3.3 実験結果と考察(各因子の影響)

実験は一つの因子につき、条件を変えた4~6個の実験装置を並列して行なった。他の実験連の結果でもその因子の評価に使えるものは用いた。ごみ量当りの O_2 吸収量の検討(または評価)を行なう場合には実験(通気)日数を一致させた。また、ごみの好気性分解に影響を与える因子は多くあるので、それらを交

絡させた実験を行なうべきであるが、実験はいずれも一次元配置実験計画で行なった。

3.3.1 けん氣的放置日数 ちゅう芥等のごみが排出されてから、埋立処分されるまでは一般にある日数が経過している。またその間は容器やポリ袋の中で、ごみはけん氣的状態におかれる。好氣的処理・処分が行なわれる場合にも、このように、ごみがけん氣的に放置されることによる影響を明らかにするのが、この実験連の目的である。この実験連は次のように行なった。実験開始日の午前中にちゅう芥類の計量、切断を行ない、12時30分から他のごみ材料を加え、さらに水を加えて水分調整しよく混合した。実験装置(カラム)への充てんを開始してから5つの全カラムに充てんを終了したのは16時ごろである。その後、間隔をおいて通気を開始したが、充てん終了後から通気開始までの時間はカラム毎に0.16, 0.80, 1.82, 2.88日であった。

実験結果のうち図6.1にカラム内温度の経時変化を示した。いずれの実験条件下でも、ほぼ同型の変化を示しており、図6.3に示すようにごみ量当りの O_2 吸収量、 CO_2 発生量、ごみ減量もほとんど同じであり、けん氣的放置日数の影響はほとんどないと考えてよい。

3.3.2 ごみ充てん密度の影響

埋立時にごみをどの程度圧縮するかは一つの課題である。充てん密度を高くすれば、単位容積当りの処理量はふえるが、通気性が悪化し、そのため、好気性分解が妨げられるおそれがある。この実験連では、ごみの初期充てん密度を0.13, 0.24, 0.32, 0.41, 0.51kg湿/1(ごみ初期含水率45.4%)と変えた5本のカラムで並列実験を行なった。なお、充てん密度0.4以上のは、押えぶたを用いてごみ層厚みを保った。また、各充てん密度における初期空けき率は、乾ごみ真密度を $1.56g/cm^3$ (夏ごみの実測値)として計算すると89.7, 80.7, 74.4, 66.7, 58.8%となる。

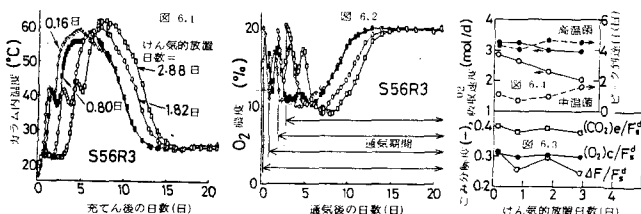


図6 ごみ充てん後のけん氣的放置日数の影響

実験結果のうちカラム内温度の経時変化と、この因子の影響を示す指標を図7に示す。カラム内温度の経時変化をみると、後述のごとく、初期含水率が45.4%と低かったため通常の実験でみられる中温菌分解によるピークが明りょうでないままに高温菌分解に移行している。低充てん密度のものは温度上昇が不十分である。一方、充てん密度が0.4~0.5と高いものは高温菌分解が終了し、30°C近くまで温度低下した後に、通気後2~3週間目に再び急激なごみ分解を示した。

また、各指標の変化からみると、0.13と0.51kg/1の低・高両極端の密度では、ごみ量当りの酸素吸収量($(O_2)_c/F_s^d$)、ごみ分解率($\Delta F/F_s^d$)、 CO_2 発生量($(CO_2)_e/F_s^d$)が低い(図7.3)。前者はごみ量不足、空けき率大の条件下で温度上昇が十分でなかったためであり、後者は高密度のため空けきが減少し、易分解物質の一部が空気と十分に接触できなかったためと考えられる。また、圧力損失は充てん密度が大きくなると急激に大きくなり、通気上の障害となる。また、低密度の場合は、ごみ厚みの沈降率が大きい。

O_2 吸収量、 CO_2 発生量、またはごみ減量とちゅう芥有機物量との関係を図7.4に示す。前者の各々と後者の間には比例関係が成立していること、また、ごみ減量はちゅう芥中の有機物量の2~4倍となっており、ちゅう芥以外のものも多く分解されていることが分る。

ごみ充てん密度が低いと温度が十分にあがらず、分解が進行しない。一方、充てん密度が高いと、この程度の通気期間では未分解のものが残り、第3のピークが遅れて出現する。したがって、ごみ分解をより早く充分に進行させるという点からは、充てん密度を0.3kg湿/1前後に止めることが適切で

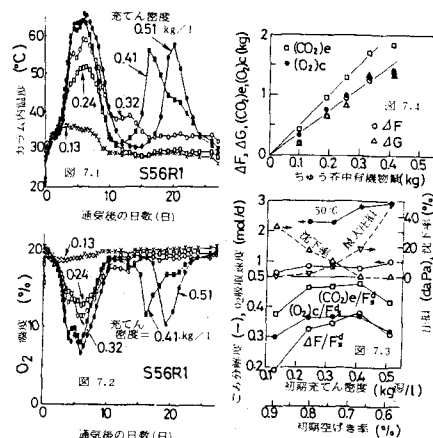


図7 ごみ充てん密度の影響

ある。ただ、含水率によってその値が変化するので、より一般的な指標で言えば空けき率を0.7～0.8程度にするのがよいといえる。

3.3.3 ちゅう芥比率、ビニール混入の影響 ちゅう芥類は主としてごみの一次分解にあずかる易分解性物質である。埋立られるごみ中に含まれるちゅう芥の比率によってごみの分解量は明らかに影響を受ける。そこで人工ごみ中のちゅう芥分の組成を調整時比率(ちゅう芥類が占める湿重割合)で11.5、21.0、38.7、52.1%の4段階に変えて並列的に実験を行なった。

表1.1に示した人工ごみではプラスチックを不活性物と考え除外したが、プラスチック類、特にフィルム状のものは通気性を阻害する物質と考えられる。そこで、プラスチック類を全重量の6.3%(内訳フィルム66.2%, パック容器13.8%, ポリピン12.5%, 発泡ウレタン4.4%, ひも3.1%)だけ混入し、他の成分は表1の(93.7/100)の割合に減少させた人工ごみをつくり実験カラムに加えた(S56R2C1)。このときちゅう芥比率は33.8%となる。

実験結果を図8に示す。カラム内温度、 O_2 吸収量は、ちゅう芥比率が小さくなるにつれて、全体的に小さくなる。実験を途中で打切ったが、ちゅう芥比率52.1、38.7%のものでは20日以降に第三の温度ピークの出現が予想される(図8.1)。ごみ量当りの $(O_2)c$ 、 $(CO_2)e$ 、 ΔF はいずれもちゅう芥比率の減少と共に減少している。 O_2 吸収速度はちゅう芥比率が大きくなるにつれて一定値に達している。

また、プラスチック混入によって $(O_2)c$ 、 $(CO_2)e$ 、 ΔF のいずれの指標も、混入しない場合に比べて低い値となっている。これは、プラスチック混入により通気性が阻害される(フィルムにより易分解性物質が包み込まれる)ことに原因があると考えられる。

ちゅう芥中の有機物量と $(O_2)c$ 、 $(CO_2)e$ 、 ΔF の関係を示すと、図8.3のようになる。この図からも前節と同様に、ちゅう芥以外の物質が分解されていることが判る。なお、この直線が原点を通らないのは、ちゅう芥比率を減少させたために、他のごみ成分の比率が相対的に高くなり、ちゅう芥以外のごみ成分中の被分解物質の混入率が増加したからである。

次に、ちゅう芥有機物量と $(O_2)c$ の関係を通気日数を25日にそろえて重ね合せると、図9のようになる。これには他の実験でのデータも含んでいる。夏ごみと冬ごみの組成の違いにより $(O_2)c$ に大きな違いが生じており、冬ごみの場合で分解が劣ることを示している。それは実験終了時にも、みかんの皮がわずかに残っていることにもあらわれている。

3.3.4 入口酸素濃度 好気性微生物の活動によりごみ分解が進行するから、通気中の酸素濃度はごみ表面への酸素移動ポテンシャルの大きさと直接的に関係がある。この点を調べるために、空気と N_2 を混合し、入口酸素濃度を21.0%(空気)、9.3、6.6、3.5、2.2%に変化させた5つの実験カラムを並べて実験を行なった。

実験結果を図10に示す。入口酸素濃度が21.0、9.3%では温度変化に大きな差はなく、入口酸素濃度が減少するにつれて温度上昇が少なく、分解時間が長くなる。また、入口酸素濃度が9.3%以下の場合では出口酸素濃度の最小値がいずれも0.1%以下となり、供給された酸素のすべてが吸収されてしまう期間が続いている。従って、ごみ分解が供給酸素量によって支配されたことが分る。

実験期間全体でみた O_2 吸収量は図10.3に示すように、入口酸素濃度2.2%を除いて(入口 O_2 濃度6.6%で最大になっているように見えるが、実験精度内で考えれば)ほぼ同じ値になっていると考えてよい。また、実験期間中での O_2 吸収量の変化(図10.4)に示すように、入口酸素濃度の高いものは15日以降あまり増加しないのに対して O_2 濃度の低いものは時間がたつと共に上昇を続けている。したがってごみ中の分解性成分は時間の経過の中でいずれ分解されるのであって、図9 ごみの種類と O_2 吸収量の関係

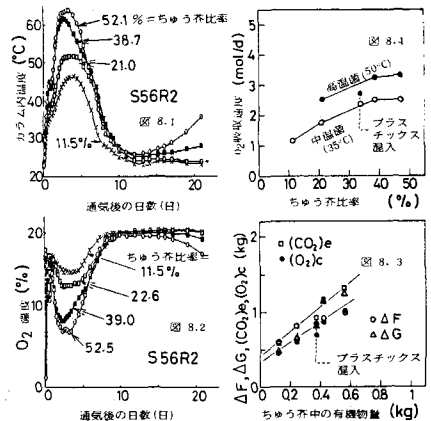
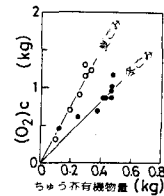


図8 ちゅう芥比率の影響



分解に要する期間は酸素供給量に支配されていると考えてよい。従って、より早く一次分解を終了させるには 1 mol/d/kg 乾ごみの酸素を供給する必要がある、この値は、ごみの要求酸素量(図12.5参照)の最高値にほぼ対応する。それ以下の酸素供給量では、ごみは酸素供給側から徐々に分解し、時間はかかるが、ほぼ同量の分解量が得られる。

3.3.5 通気量 好気性微生物の活動によるごみ分解が進行する上で必要な酸素供給量がどの程度であるかを、ここでは通気量を変えて調べてみた。これは好気性埋立において通気量を設計・計画する上で重要な指針となる。通気量を0.3, 0.15, 0.05 Nl/分 に変えた3つの実験カラムを並行して行なった。

実験結果をカラム内温度の経時変化とこの因子の影響を示す指標を図11に示す。通気量が小さくなるにつれて、分解が遅れ温度上昇も小さくなる。出口酸素濃度の最小値は1~4%あり、供給された酸素のすべてが利用されてはいないことが分る。すなわち、通気日数を同じにして図10.3の $(\text{O}_2)_c/F_s^d$ に重ねると、入口酸素濃度を変えて酸素供給量を変えた場合に比べて低い O_2 供給量となっており、実験での32cmのごみ層ではまだ十分に吸収されないと解釈される。

3.3.4節で示した必要酸素供給量を考慮して

必要空気供給量を計算すると標準状態で 110 l/d/kg 乾ごみが適当である。一方、都市ごみのたい肥化では、低流量($250 \sim 400 \text{ l空気/日/kg IL}$)では、4日目で見えるピークが7日目で見え、高流量($2100 \sim 4870 \text{ l/日/kg}$)では、かえって冷やされるので $560 \sim 1800 \text{ l/日/kg}$ が適当である¹²⁾ といわれているが、埋立の場合、数日の時間的滞りより、空気吹込みエネルギー節約の点から前述のように低流量に設定するのが適当であると思われる。

3.3.6 ごみ中の初期含水率 季節によっては混合ごみの含水率が高くなり、60~70%に及ぶことが報告されている¹⁶⁾。そこでごみの含水率がどのようにごみ分解に影響を与えるかについて検討した。都市ごみのたい肥化では50~60%の含水率が適当で、70%では高すぎる¹⁷⁾ といわれている。水分は微生物の活動に必要なものであるから、一定の含水率がないと微生物の活動は阻害される。しかし、一般に用いられているごみの含水率はごみ層全体にわたって平均された値である。ちゅう芥そのものはかなり高い含水率であるため、ちゅう芥に含まれていた水分や、外部から加わった水分は紙・布などの吸水性の高いものに吸収される。吸収される以上にごみ層内の水分が増えると、過剰の水分がごみ層の空けきをうめ、通気性が悪くなり、また水分を含んで軟柔になった紙・布が空けきを押しつぶし、さらに水膜が形成されると酸素の移動抵抗は増加し、結果としてごみ分解を阻害することとなる¹⁷⁾。従って埋立では含水率の高い方で影響が出ると考えられたので、ごみの初期含水率を55.1, 60.8, 70.9, 73.2, 78.7%と変えたカラムで並行的に実験を行なった。

実験結果をカラム内温度、排ガス中の O_2 濃度の経時変化と $(\text{O}_2)_c/F_s^d$, $(\text{CO}_2)_e/F_s^d$, $\Delta F/F_s^d$ 及び 50°C の O_2 吸収速度で図12に示した。 $(\text{O}_2)_c/F_s^d$, $(\text{CO}_2)_e/F_s^d$ では、条件のよく似たもの

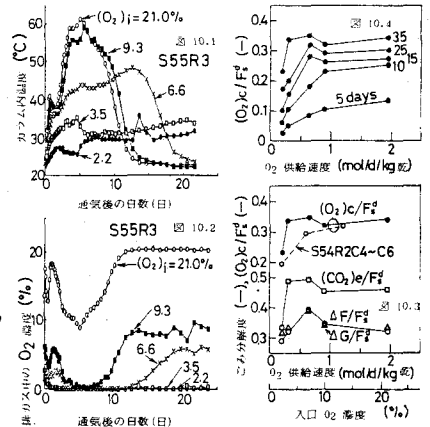


図10 入口酸素濃度の影響

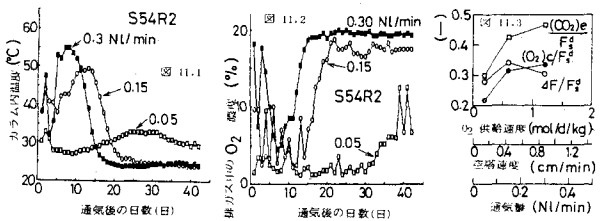


図11 通気量の影響

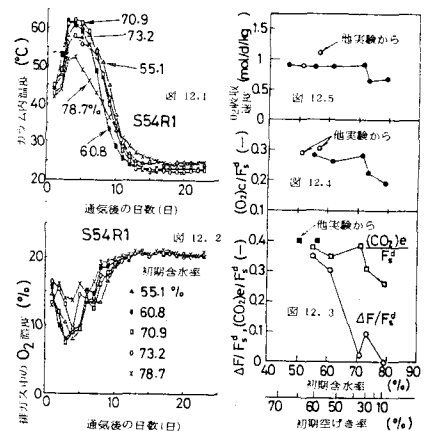


図12 初期含水率の影響

の結果も通気日数を一致させて、併せて示した。 $\Delta F/F_0^d$ の図を除いて、いずれの図でも71%以上の初期含水率でごみ分解が悪くなっている。70%以下の含水率では、ほぼ一定のごみ分解状況を示している。これはごみ分解によって生じた水分が紙や繊維類に吸収されるため、水分が特別な妨害をしないものと考えられる。初期含水率として71%程度が水分の高い方の限界である。

3.3.7 間欠的通気 通気が間欠的になった時に、ごみ分解にどのように影響を及ぼすかを検討するため、空気と窒素ガスを交互に数回通気し、最終的には空気のみを通気する実験を行なったが、結果は紙面の都合で省略する。

4. まとめ

本論文では都市ごみが好気性埋立のようにたい積された状態で、通気をうけて好気性分解を行なっている場合に、分解速度に影響を及ぼす因子について実験的に検討を行ない、以下に要約する結果を得た。

- (1) 保温されたカラム内でのごみの好気性分解による温度上昇には一定の形があり、詳細にみると複数の温度ピークがあらわれる。
- (2) ごみ層内の温度変化と CO_2 発生量や O_2 吸収量は呼吸商からみて分解進行状況をほぼ同等に表わす指標となり、相互の関係は、単糖やセルロース分解を想定した時の反応式に基づいた関係に近似できる。
- (3) ごみ層内の温度は好気性分解による発熱とごみ層外への放熱を考慮した熱収支から求めることができる。
- (4) ごみの分解量は夏型ごみと冬型のごみで違いが見られるが、いずれも1次分解終了時でのごみの初期乾量の3～4割である。この分解量はごみ中のちゅう芥成分中の有機物量の2～4倍に達する。
- (5) 好気性分解を開始する前にごみをけん氣的状態で放置しても、その期間が短い(2日程度まで)ならば分解初期にややくれを生ずるだけで、大きな影響はない。間欠的に通気を止めたときも同様である。
- (6) ごみの充てん密度が極端に小さく、空けき率の大きい場合や、逆に圧密過剰となると好気性分解は障害をうける。実験では空けき率0.7～0.8(人工ごみで含水率45%程度の場合充てん密度0.25～0.4 kg湿/1)が適当であった。
- (7) ちゅう芥混入率が約12%程度に少くても、ごみ中の他の有機物分解を促進している。プラスチックシート類の混入は好気性分解を局部的に妨げる。
- (8) ごみ層内への O_2 の供給が不足すれば好気性分解は阻害される。速かな分解(一次分解)を期待するにはほぼ1 mol/日/kg(乾ごみ)が全層に供給されることが必要である。
- (9) ごみの分解により水分量は変化するが、初期の分解を速に行なわせるためには含水率70%以下であることが望ましい。

ここで得られた結果はごみの好気性分解を小規模なカラムに充てんした人工ごみについて行なったものである。実験装置で起っている分解挙動と装置特性との関係は以上の実験でかなり明らかになし得た。

実際の埋立地にこうした結果を適用するためには、カラム内の状態と実際にたい積しているごみ層のそれらとの違いが考慮されねばならないが、後者の実態調査は今なお不十分である。特に実際の場に適用する場合に、ごみの組成や形状・寸法の不均一性の影響をどのように考慮するかが今後の課題である。

最後に本研究を行なうにあたり、実験に協力して下さった方の氏名を列記し、感謝の意を表す。

角田芳忠、金子正士、牧明彦、高倉法夫、二階堂匠、相川雅文、富原修也、髙岡賢悟、髙岡裕子

引用文献 1) 花島正孝, 他: 土木学会論文集, No.310(1981)、2) 花島正孝, 他: 都市と廃棄物, 3, No.7, No.8, No.9, No.10, No.11(1973)、3) 左倉正雄, 他: 都市清掃, 34, No.124(1981)、4) 吉本耕司: 公害と対策, 16, 162(1980)、5) 吉崎寛樹: 処理 & リサイクル, No.1, No.2, No.8, No.9(1980)、6) 久保田宏, 他: 化学工学, 41, 364(1977)、7) 神山桂一, 他: 文部省一般研究B 246127, 昭52, 53年成果報告書, 7(1979)、8) 岩井重久, 他: 23回臨対協講演集, 65(1962)、9) 山根恒夫: 「生物反応工学」, 116 産業図書(1980)、10) Finstein, M.S.: Compost Science/Land Utilization, 21, No.4, 25(1980)、11) Clerk, C.S., et al: ASCE, 103, No.EE1, 47(1978)、12) Finstein, M.S., et al: Adv. Appl. Microbiol., 19, 113(1975)、13) 平山直道編「ごみ処理施設の構造と管理」43, 日環センター(1977)、14) 永井史郎: 発酵工学, 56, 553(1978)、15) 梶本彦久寿: 三菱重工技報, 15, 665(1978)、16) 土橋正二郎, 他: 21回全国環境衛生大会資料集, (1977)、17) Suler, D.J., et al: Solid Waste Appl. Environ. Microbiol., 33, 345(1977)、18) 中丘澄: 公害と対策, 16, 132(1980)