

大阪府中央卸売市場における生ごみの発酵堆肥化

Composting of Garbage at Osaka Prefectural Central Wholesale Market

宮内 修平* 井本 泰造* 岩崎 和弥*
Shuhei Miyouchi Taizo Imoto Kazuya Iwasaki

(1997年12月4日受理)

キーワード：中央卸売市場，生ごみ，発酵槽，堆肥化，減量化，資源化，発熱量，肥料

1. はじめに

大阪府中央卸売市場は，昭和53年5月，北大阪地域の400万人を越える消費者に対して，生鮮食料品等を円滑かつ安定的に供給することを目的に茨木市南部に設置された。北大阪地域の消費人口の増加に伴い，同市場の取扱量も順調に増加し，平成6年度には約43万トンにも達している。しかし，同市場から排出する廃棄物も年々増加し，平成6年度には12,400トンにも達しており，人口3万人規模の市町村に匹敵する膨大な量となっている。

市場から排出される廃棄物には生ごみ，発泡スチロール，段ボール等がある。生ごみは可燃性ゴミとして都市清掃工場で焼却処分されている。また，生ごみ以外の廃棄物の内，発泡スチロールは熔融固化された後，文房具等の原料として年間200トン程度がリサイクルされ，段ボール等についても，リサイクル可能なものについては，ほぼ全量が再生されており，生ごみ以外の廃棄物の減量化はほとんど望めない。

一方，市場から排出されるごみの内，その約7割が野菜屑，果物屑，魚アラ等のいわゆる「生ごみ」であり，これを減量化することがはるかに効果的である。その方法の一つである，生ごみ高速堆肥化は，このような生ごみの大幅な減量化と製品堆肥の資源循環が可能なることから，このたび，これら生ごみの100%減量を目指したシステムを開発することとした。

本報告では，現在一般的に行われている生ごみの堆肥化処理について，その概要を焼却処理と比較した利点，堆肥化反応における支配因子，堆肥化装置および堆肥化

における熱収支の各項目について述べる。

つづいて，大阪府中央卸売市場内で実際に発生する生ごみを対象に，今回新たに開発した生ごみ高速発酵堆肥化装置を紹介し，実用化に向けた取り組み，主として減量化を目的とした実験結果について報告する¹⁾

2. 堆肥化処理について

(1) 堆肥化処理の利点²⁾³⁾

生ごみの堆肥化処理は廃棄物の資源化の一方法として古くから利用されてきた技術である。しかし，発生ごみの種類と量の増加により，現在そのほとんどが焼却処理されており，堆肥化処理は全発生量のわずか0.1%程度にすぎない。すなわち，一見有効と思われる堆肥化処理には，

- ①処理速度が遅い
- ②減量率が小さい
- ③プロセス前後において選別操作が必要
- ④製品堆肥の安定した需要先の確保難
- ⑤製品堆肥の品質や安全性の確保

等の問題があり，十分普及していないのが現状である。

他方，わが国農業は化学肥料による収量拡大のもとで地力低下が著しく，さらに，環境問題や有機質農法の見直しが大きく取り上げられ，資源リサイクル，農産物の安全性ともからんで堆肥が見直されつつある。さて，一般的に行われている焼却処理については次のような問題点がある。

- ①高温燃焼処理のため炉内および機器の損傷が激しく，維持管理費が高く，また，運転管理も難しい
- ②集塵機の設置および飛灰の無害化が必要
- ③ダイオキシンに代表される有害物質の発生の可能性

* システム技術部 環境システムグループ

④排ガス中に含まれるNO_x, HClの洗浄が必要

⑤焼却灰の最終処分場の確保難

現在、焼却処理場の建設コストは、処理能力トン当たり5,000万円前後と急激に上昇しており、焼却経費はトン当たり1~2万円にもなっている。そこで、生ごみの処分にあたって、先に述べた問題点はあるものの、今一度堆肥化処理を焼却処理と比較すると、次のような利点がある。

①低温処理(60℃前後)のため、運転管理が容易で維持管理費が低い

②60℃前後で発酵が進行するため、数日間で病原菌は死滅し衛生的

③生物処理であるので排ガス中にはCO, NO_x等の発生は皆無

④ダイオキシン等の有害物質の発生がない

⑤通常、発熱反応であるため、熱源が不要

⑥堆肥化反応は湿り状態で進むため粉塵はなく、集塵機は不要

⑦排ガス処理はアンモニアを主体とする臭気処理のみで十分

⑧製品堆肥は農地還元により資源循環が可能となり、最終処分場を必要としない

以上、焼却処理されている生ごみも堆肥化することで、より安全、安価に処理される可能性があり、資源循環にも役立つ。

(2) 堆肥化反応における支配因子⁴⁾

堆肥化反応は微生物による有機質の分解反応で、通常は好氣的条件下で短時間で生物的に安定化することであるが、原材料の物理・化学的性状により反応時間や処理方法が異なるのが普通である。好気性堆肥化反応を進める上で考慮しなければならない代表的な支配因子を次に示す。

(A) 水分

微生物が活性を維持するためには水分の確保が不可欠であるが、固形物を対象とする好気性堆肥化にとって、過剰水分は嫌氣的条件を招き、微生物活性を著しく損なう。従って、水分は濡れたり乾いたりする状態ではなく、ある程度湿っている状態が望ましく、水分量は一般的に30~70%程度が適当である。

(B) 温度

反応速度は60℃前後で最大となり、2~3日続けば病原菌や雑草種子が死滅する。また、この温度は露点を高く保ち水分蒸発にも適当な温度である。

(C) 通気

微生物の要求酸素量に見合った通気を行えばよいが、この通気により水分蒸発や温度制御も行うために、通気量は一般的に0.05~0.2m³N/min程度が適当である。

(D) 繰り返し

繰り返しは発酵槽の種類と発酵状態にもよるが、1日に数回行われ、発酵状態の良いものほど回数を多くする必要がある。

(E) 微生物

高温性のバクテリアと放線菌が主に反応を受け持ち、難分解性の発酵が始まる反応後期になると、糸状菌が支配的となる。

(3) 堆肥化装置⁴⁾⁵⁾

堆肥化装置には、受入、破碎、選別、調整、堆肥返送、発酵、後処理、貯留、搬出、脱臭等、多くの設備が必要となる。ここでは、堆肥化装置の中心となる発酵設備について述べる。発酵設備は通気、移送、繰り返しの工程からなっており、これには図1に示す多くの形式があり、また、これらを組み合わせた方式もよくみられる。以下に代表的な発酵槽の構造を示す。

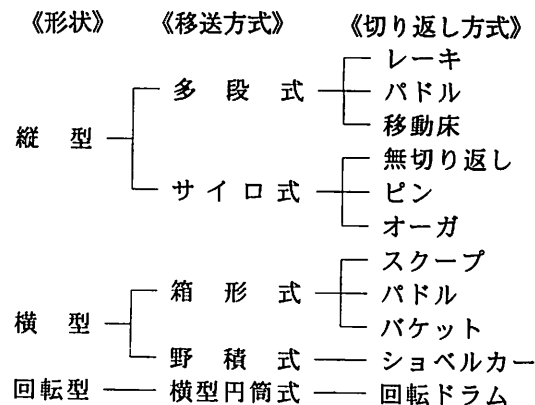


図1 発酵槽の形式⁴⁾

(A) 縦型多段式発酵槽(図2)

上下方向に数段の発酵室があり、最上段に投入された原料が下段に落下していく過程で発酵が進む。従って、各段個別に送気が可能なため、発酵状態に応じた送気量が確保される。通常、円形が多く、回転アームに取り付けられたレーキやパドルで繰り返しが行われる。方形の場合には、移動床等によって繰り返しが行われる。装置が大がかりであるが、各段の堆積厚みが1m以下と薄いため有効容積が小さい。

(B) 縦型サイロ式発酵槽(図3)

縦型多段式発酵槽と外観は変わらないが、発酵室は一つで構造は簡単であり、上部から原料が投入され、製品は下部から排出される。送気は全体に見合った量を下部に入れ上部から排気することが多く、多段式発酵槽に比べて堆積厚みが数mと厚いため、送気の圧力損失が大きい。しかし、構造が簡単なため、畜産関係で多く用いられている。

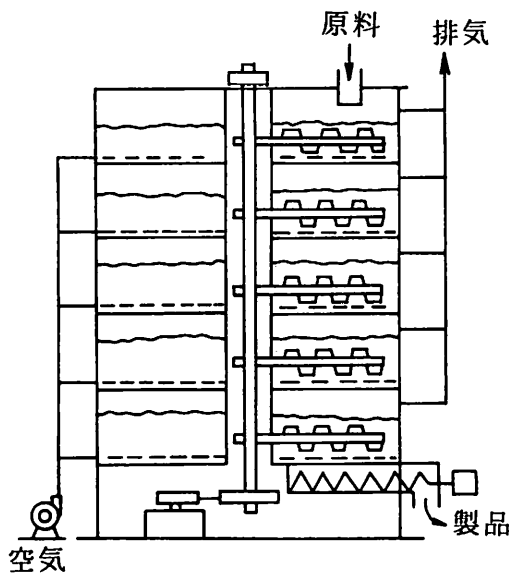


図2 縦型多段式発酵槽(パドル式)

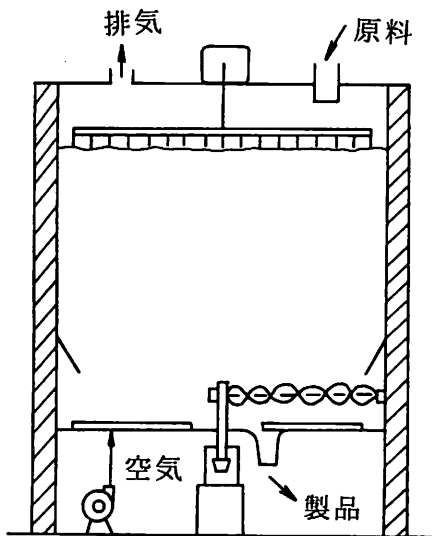


図3 縦型サイロ式発酵槽

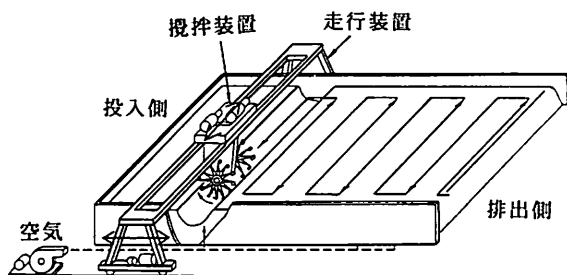


図4 模型箱式発酵槽

(C) 横型箱式発酵槽(図4)

1 m前後の厚みで平面的に広げられた発酵槽で、堆肥化物は機械式切り返し装置によって一方向へ移動する。送気は下部から行うが、開放型であるため切り返しで十分な場合もあり、設置されない場合もある。開放型であるために設備機器の維持管理は容易であるが、設置面積が広く、排ガスの臭気対策が困難である。大型畜産団地等で採用されているケースがある。

(D) 横型野積式

いわゆる自然放置の状態に最も近い方法で、底部より送気したり、一定期間でショベル等により切り返しを行ったりしている。一般に機械式は、切り返しによって、発酵の進行方向に沿って堆肥が移動されるが、この方式はショベル等により全体が切り返されるため、完全なバッチ運転となる。畜産廃棄物の水分調整用、または、二次発酵等の熟成用によく用いられる。

(E) 回転型円筒式発酵槽(図5)

横型回転円筒内で堆肥化する発酵槽で、都市ごみ堆肥化施設に古くから用いられている。切り返しは円筒の回転により、堆肥が持ち上げられ落下する時に行われる。移送は、円筒の回転により円筒内のレベルが平準化すること、または円筒を下流方向に傾斜することで行われる。送気は円筒の一方から反対方向へ行われる。構造的に簡単なこと、回転落下のさいに堆肥化物の破碎が期待できることから、発酵の前処理として利用されることが多い。

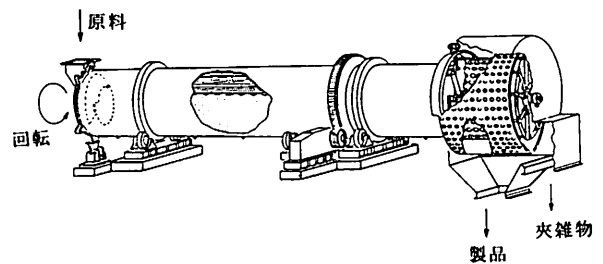


図5 回転型円筒式発酵槽

以上、各種の発酵槽を紹介したが、処理量およびごみの性状により、採用可能な形式が決まってくる。なお、同一形式であっても、詳細についてはメーカー各社のノウハウがあり、細かなところで構造および運転方法が異なるのが普通である。

また、一般に、堆肥の滞留日数(N)は発酵槽の有効容積(V₀)、投入量(V₁)、排出量(V₂)から次式であらわされる。

$$N = \frac{2 V_0}{V_1 + V_2}$$

(4) 堆肥化における熱収支²⁾³⁾

発酵堆肥化過程は微生物による有機物の酸化反応であり、緩慢な燃焼反応ともいえる。従って、好気的な条件下で進行する堆肥化過程は熱の発生を伴い、この発生熱量をいわゆる燃焼熱と考えればよいことになり、生ごみはその燃料になっていると考えられる。そこで、生ごみの発熱量は元素分析による各元素の重量割合をもとに、次に示す固体燃料の発熱量を求める Dulongの式(6)を用いて、総発熱量Hgおよび真発熱量Hnを推定する。

$$H_g = 34,000C + 143,000(H-O/8) + 94,500S \quad (\text{kJoule/kg})$$

$$H_n = H_g - 2,500(9H+W) \quad (\text{kJoule/kg})$$

今回の試験における生ごみ組成を表1に示す。表1から、この生ごみの総発熱量は $H_g = 19,300 \text{ kJoule/kg}$ で、真発熱量は $H_n = 1,720 \text{ kJoule/kg}$ となる。しかし、発酵は高温燃焼と異なり、有機物に含まれる可燃成分の全てが酸

表1 生ごみ組成

水分 %	乾物当たり (%)				
	炭素	水素	酸素	その他	灰分
89	49.06	6.62	37.55	1.97	4.8

化するのではなく、酸化分解の度合いにもよるが、一般に生ごみの有機物分解率は約80%と言われている。従って、残りの約20%に相当するものは、微生物の死骸、有機物の未分解物等と考えられ、これらを総称して、一般に堆肥(コンポスト)と称している。ここでは、簡単のために有機物の20%がそのまま堆肥として残ると仮定すると、堆肥の排出率M(%)は次式で表される。

$$M = (100 - H_1) \times (100 - F) / (100 - H_2) \times 100$$

H_1 : 原料(生ごみ)の水分率(%)

H_2 : 製品堆肥水分率(%)

F : 有機物分解率(%)

ここで、 $H_1 = 90$, $H_2 = 50$, $F = 80$ とすると堆肥の排出率Mは4.4%と非常に小さな値となり、堆肥化により大幅な減量化が可能であることが想定できる。

一方、生ごみの有機物分解率を80%と仮定したことから、発酵による総発熱量 Q_1' も同様に80%と想定できる。

$$Q_1' = H_g \times 0.8 \quad (\text{kJoule/kg})$$

この値をもとに、一日の生ごみ処理量を100kgとした場合の発酵堆肥化について熱収支の検討を行った。従って生ごみの発酵による総発熱量 Q_1 は

$$Q_1 = Q_1' \times 100 \quad (\text{kJoule/日})$$

堆肥化によって系外に排出される水分量Wは次式で表される。

$$W = a + b - c \quad (\text{kg/日})$$

a : 生ごみの持ち込み水

b : 有機物の分解(80%)により発生する水

c : 堆肥が持ち出す水

この式から、堆肥化により系外に排出される水の量は、生ごみの重量の約90%にもなることが分かる。この水は発酵排ガスとともに水蒸気となって、湿りガスの状態で発酵槽の系外に排出される。そのための蒸発必要熱量 Q_2 は次式となる。

$$Q_2 = W \times 2,520 \quad (\text{kJoule/日})$$

この時、水の絶対湿度(100%湿り)Hは、排気温度(発酵温度)Tによって次式³⁾で表される。

$$H = 0.0048 \times \exp(0.0576 \times T) \quad (\text{kgH}_2\text{O/kgAir})$$

この絶対湿度と空気比重量(1.28)から発酵用空気量Vが決定される。

$$V = W/H/1.28 \quad (\text{m}^3\text{N/日})$$

図6は発酵用空気量を生ごみ処理量100kg、排ガス相対湿度95%、空気余剰率を10%として計算した結果を示したものである。

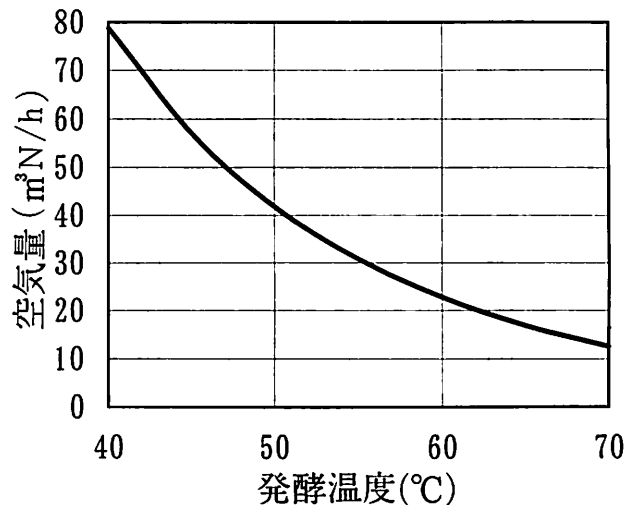


図6 生ごみ100kg当たりの発酵温度と空気量

また、この発酵用空気も堆肥化過程での Q_2 の熱を奪い系外に出る。

$$Q_3 = V \times (T - \text{外気温}) \times \text{比熱} \quad (\text{kJoule/日})$$

同様に、排出堆肥も Q_3 の熱を奪い系外に出る。

$$Q_4 = M/100 \times (T - \text{外気温}) \times \text{比熱} \times 100 \quad (\text{kJoule/日})$$

さらに、投入生ごみも発酵槽内で Q_4 の熱を奪う

$$Q_5 = (T - \text{外気温}) \times \text{比熱} \times 100 \quad (\text{kJoule/日})$$

次に、発酵槽からの放熱量 Q_6 は発酵槽本体(外径1.1m、長さ3m)の外壁面積S、総括伝熱係数N、対数平均温度差 ΔT とすると次式で与えられる。

$$Q_6 = S \times N \times \Delta T \times 24 \quad (\text{kJoule/日})$$

従って、発酵堆肥化による熱収支Qは

$$Q = Q_1 - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6)$$

- Q₁ : 有機物分解による総発熱量
- Q₂ : 水分蒸発熱量
- Q₃ : 空気持ち出し熱量
- Q₄ : 堆肥持ち出し熱量
- Q₅ : 原料加温熱量
- Q₆ : 発酵槽放熱量

となり、この値が、正である場合には、発酵熱のみで円滑に堆肥化が進行するが、負になった場合には、灯油等の補助熱源を使用しなければ円滑に堆肥化は進行しないことになる。今回の試験では、生ごみ水分量が高いため補助熱源として灯油を用いた。

また、実際の堆肥化設備から排出するガスには多量のアンモニアが含まれ、脱臭設備が必要となる。このため脱臭効果として、最も確実な焼却脱臭を採用した場合に

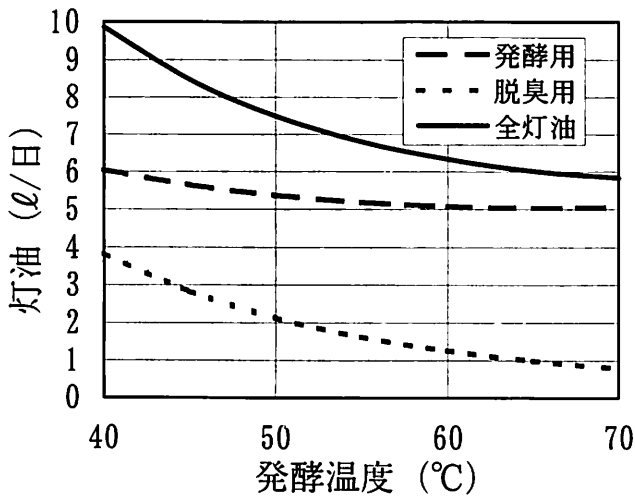


図7 生ゴミ100kg当たりの発酵温度と灯油消費量

ついて検討した。なお、焼却脱臭の熱効率は95%と設定している。

図7は、発酵用、脱臭用に必要な灯油消費量を示したものである。図6、図7から、発酵槽内温度を高くすることで、発酵用空気量および灯油使用量を大きく減少することが可能となり、大幅な省エネルギー効果が期待できる。

3. 実験装置および方法

(1) 実験装置、実験方法

今回の研究では、横型回転円筒式発酵槽を用いて実験を行った。この方式は、多段式に比べて有効容積が大きく構造が簡単であり、サイロ式に比べて投入材料の圧密がなく好氣的条件が得やすく、かつ送風圧が低くできる。また、箱形、野積式と比べて開放型でないため排ガス対策が容易である等の理由から本方式を採用した。

図8に試験装置の概要を示す。原料は破砕機により破砕されて供給機に投入され、タイマーに連動した定量切出しが行われる。定量切出しされた原料はスクリーフィーダーにより発酵槽(有効容量約1,200 l)に運ばれ、発酵槽の中で9分に1回転という回転を与えられながら排出側に進み、堆肥化が進行する。排出側から出た堆肥はコンベヤにより振動篩機に送られ、ここで0.5mm以下の製品堆肥が篩い分けられる。10mmを越える夾雑物は再度破砕され0.5~10 mmの中間篩物とともに返送コンベヤにて再びスクリーフィーダーに戻され、原料と混ざって、水分調整材としての役割を果たしながら再び発酵槽に進む。

また、発酵槽内温度を約50°Cに保つため、排ガス温度に連動しON、OFF制御が可能なバーナを発酵槽入口側

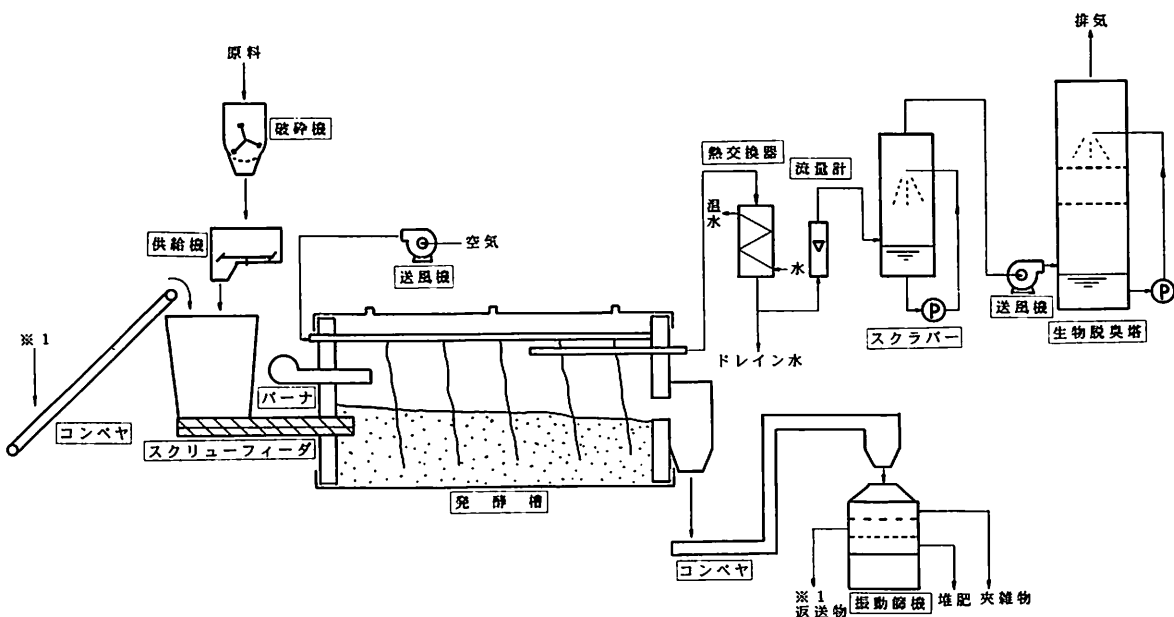


図8 堆肥化試験装置の概要

に設置した。バーナにより余分に加えた熱量は、実験終了時の灯油消費量から求めた。

実験に際しての測定項目として、排ガス中の酸素濃度、と二酸化炭素濃度は連続排ガス分析器により測定し、発酵槽内温度と発酵槽内堆肥温度は熱電対にてデータロガーを介して打点記録計およびパソコンに取り込んだ。排出堆肥の水分、pH、アンモニアおよびかさ比重は必要に応じて手分析にて測定した。

また、原料となる生ごみは、中央市場から発生するものを使用し、発生割合に応じて、野菜：果物：魚アラ＝2：2：1の比率で投入した。

(2) 生ごみ投入実験

(A) 予備運転

機器の調整・改造を行うとともに、水分調整材(オガ屑)および種堆肥を適宜追加しながら、定常運転になるまでの準備期間で、生ごみ投入量も一定していない。この間に投入されたオガ屑は262kg、種堆肥は63kg、生ごみの投入量は1,095kgであった。また、発酵用に送られる空気量は、初期のオガ屑の水分が約20%と乾いているために、 $12\text{m}^3\text{N/h}$ と小さな値であった。

(B) 定常運転 I (日量100kg処理)

安定した運転状態がほぼ継続できることを確認したので、初期の目的である日量100kg投入処理に入るとともに、発酵槽内温度を一定の約 50°C に保つため、バーナのON、OFF制御運転を始めた。発酵槽内堆肥の水分は徐々に上昇してきたので、水分蒸発の促進をはかるため、空気量は予備運転の $12\text{m}^3\text{N/h}$ から漸次増加させ、最終的には計算上の目標値である $42\text{m}^3\text{N/h}$ にした。この間に投入した生ごみ量は2,800kgであった。

(C) 定常運転 II (日量150kg処理)

実用プラントを設計するにあたり、初期投資の低減化が償却期間に与える影響が大きいため、できるだけ設備の小型化を図ることが求められた。そこで、それらを検討する目的で、現状の誘引送風機の最大能力に近い $63\text{m}^3\text{N/h}$ の空気量を与え、一方生ごみの処理量を日量150kgとした。この間に投入した生ごみ量は4,800kgであった。

4. 実験結果

実験結果を表2に示す。この表の値から、投入生ごみの減量化率および乾物(有機物)分解率を計算できる。

なお、オガ屑は分解困難物、種堆肥は分解完了物として扱い、両者ともに減量化に寄与しないものと仮定した。

計算の結果、投入生ごみ減量化率 η_1 は

$$\eta_1 = 100 - \frac{\text{堆肥}-\text{オガ屑}-\text{種堆肥}}{\text{投入物}} \times 100$$

$$= 95.7\%$$

有機物分解率 η_2 は

$$\eta_2 = 100 - \frac{\text{堆肥乾物}-\text{オガ乾物}-\text{種乾物}}{\text{投入乾物}} \times 100$$

$$= 82.9$$

となり、大幅な減量化と有機物分解率が得られた。

また、この時の灯油消費量は528ℓで、生ごみ投入物1kg当たりに換算すると、0.061kgとなった。

また、実験終了後の排出堆肥を篩いにかけて、2mm以下のものについて成分分析を行った結果を表3に示した。

表2 生ごみ投入結果

運転状態	オガ屑	種堆肥	生ごみ	排出堆肥
A	262	63	1,095	0
B	96	30	2,800	85.5
C	0	0	4,800	735.9
計	358	93	8,695	*821.4
有機物重量	286.4	37.2	956	486.7

*：発酵槽内より全量排出

表3 排出堆肥の成分(%)

水分	50.5
pH (—)	8.2
EC (mS/cm)	11.5
C/N (—)	10.6
窒素	2.13 (4.30)
リン	1.26 (2.55)
カリウム	1.80 (3.64)
ナトリウム	0.69 (1.39)
カルシウム	1.71 (3.45)
マグネシウム	0.25 (0.50)
灰分	11.9 (24.0)

* () 内は乾物当たり

以上のように、実験そのものは当初の目的である生ごみの減量化と堆肥化が十分可能であることを実証したものであったが、実験期間が短いことや、運転中に不具合が生じて、定常状態にできるだけ装置を維持する必要から、装置に適切な改良が加えられなかったことが、問題点としてあげられる。具体的には次のような不具合が生じた。

①破砕機的能力不足から、生ごみの破砕が粗くなっ

た。

- ②供給機にタイマーを連動させたが、定量供給が十分でなかった。
- ③返送コンベヤの持ち帰りによる堆肥の落下で、返送堆肥量の平準化が困難であった。
- ④振動篩の目詰まりが激しく、製品堆肥の円滑な取り出しができなかった。
- ⑤発酵槽内空間にバーナを設置し槽内温度を制御したため、燃焼ガスが槽内上部をショートパスし、熱効率の低下を招いた。

しかしながら、これらの問題点はほとんどが機械的に解決できることから、現在実用プラントに向けて改良中である。

5 おわりに

生ごみの発酵堆肥化実験を行ったところ、投入生ごみ減量化率は約96%、有機物分解率は約83%となり、予め試算した値とほぼ一致した。この結果から、生ごみの堆肥化は減量化の上からも非常に有効な処理方法と思われる。

また、排出堆肥の成分は通常の堆肥と変わらない値を示した。重金属の含有についても、カドミウム0.41ppm、水銀0.67ppm、砒素3.49ppmで、土壌改良材等の特殊肥

料としてそれぞれの規制値5ppm, 2ppmおよび50ppmに対して1/3から1/10と十分低く、使用に際して問題のないことが分かった。

以上のことから、中央卸売市場のように大量に生ごみが発生し、しかも重金属の混入の恐れがほとんどない小さい事業所においては、堆肥化は生ごみの大幅な減量化を図ると共に、堆肥として資源循環を可能とする有効な手段であることが判明した。

参考文献

- 1) 飲食店等動植物性残渣リサイクルモデル推進事業調査検討報告書、大阪府動植物性残渣リサイクルモデル事業協議会、1997
- 2) 宮内修平, ゴミコンポストについて、配管技術, 35(7),56(1993)
- 3) 井本泰造, 宮内修平他, 事業系厨芥の堆肥化について、大阪府立産業技術総合研究所報告技術資料, 1994, No.4
- 4) (社)全国都市清掃会議編, ごみ処理施設構造指針解説, 1992, p532-537
- 5) 環境機器活用事典編集委員会, 廃棄物処理・リサイクルの技術と機器, 産調出版, 1988, p402
- 6) 辻正一, 燃焼機器工学, 日刊工業新聞社, 1987, p20