

## 堆肥プラント向け大型脱臭装置の開発

## Development of Large-Scale Deodorization Apparatus for Compost Plants

技術開発センター  
第四開発室 技師  
牧野 尚  
Takashi Makino

技術開発センター  
第四開発室 技師  
水上 義之  
Yoshiyuki Mizukami

技術開発センター  
開発管理室  
笹嶋 幸輝  
Kouki Sasajima

技術開発センター  
第四開発室 室長  
博士(工学) 山本 清司  
Kiyoshi Yamamoto

## 要 旨

臭気問題を抱えている堆肥化プラントの悪臭対策として、様々な方式の脱臭設備が導入されている。その中でも、近年、堆肥化プラントでの主な臭気源である水溶性ガスに対して脱臭効果が高いとされる充填塔式生物脱臭システムの採用が増えてきている。しかし、生物脱臭方式は大風量への対応の難しさや脱臭できる臭気の強さに限りがある等の課題を抱えている。当社では大風量化と高性能化を可能にするために酵素水を活用した新たな生物脱臭装置の機構を採用し、開発を行った。この方式により大風量化した実証モデルにて、食品残渣堆肥化プラント内での実証試験を実施した。試験結果からプラント内では、共に臭気強度が5以上あった酪酸とアンモニアの臭気に対して、脱臭装置の出口部では臭気強度を3.5以下までに低減する性能が示された。本稿では新たな生物脱臭装置の機構の検証と実証試験成果について報告する。

## Abstract:

Composting plants have odor problems, and various types of odor control equipment have been introduced to deal with the odor. In recent years, there has been an increase in the adoption of packed tower biological deodorization systems, which are said to be highly effective at deodorizing water-soluble gases, the main source of odor in composting plants. However, biological deodorization methods have issues such as the difficulty of dealing with large air volumes and the strength of odors that can be deodorized. We have adopted and developed a new biological deodorizing mechanism that utilizes enzyme water to enable large air volume and high performance. A demonstration test was conducted in a food waste processing plant using a model designed for large air volumes that employs this method. The test results showed that the odor intensity of butyric acid and ammonia was initially 5 or more within the plant. At the outlet of the deodorizing apparatus, the odor intensity was reduced to 3.5 or less. This paper reports on the verification of the mechanism of the new biological deodorization apparatus and the results of the demonstration test.

## 1. 緒言

日本における食品ロスは今和四年度推計値では約470万トンといわれており、そのうち事業活動に伴い発生する「事業系食品ロス」は約230万トンにも及んでいる<sup>1)</sup>。環境問題が課題とされる現代では、食品残渣の焼却で発生するCO<sub>2</sub>を低減するため、食品残渣そのものを減らす取り組みはもとより、「飼料化」、「堆肥化」、「きのこ菌床への活用」、「メタン化によるエネルギーの利用」等のリサイクルが進められている。一方、「堆肥化」の過程で発生する臭いは近隣住民との臭気問題に発展することも多い。臭気問題が発生すると事業運営に支障

をきたすことから堆肥化プラントに悪臭対策として、脱臭設備を導入することが一般的である<sup>2)</sup>。従来の脱臭設備として、薬液洗浄法(スクラバー方式)や活性炭吸着法が採用されることが多かった。しかしながら、これらの方式はランニングコストが高く、維持管理が煩雑などの欠点があるため、近年では、水溶性ガスの脱臭効果が高いとされる充填塔式生物脱臭方式の採用が増えてきている<sup>3)</sup>。生物脱臭法は初期コスト及びランニングコストが安い特長がある反面、大風量への対応には設置面積の問題や脱臭できる臭気の強さに限りがあるとの指摘もある。Fig. 1に一般的な充填塔式生物脱臭装

置の構成を示す。

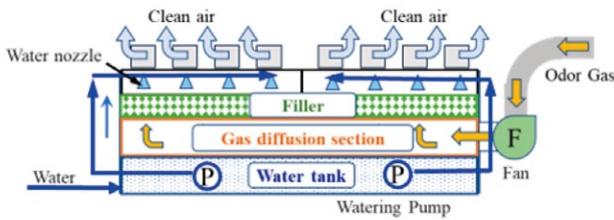


Fig. 1 Typical packed tower biological deodorization apparatus configuration.

- 充填塔式生物脱臭装置の基本構成として①充填材、②微生物群、③通気・水分管理システムに大別される。
- ① 充填材は、微生物が定着しやすい有機または無機の支持体が採用される。
  - ② 微生物群は主に好気性バクテリアであり、対象臭気と相性の良い微生物が自然と定着し、代謝により臭気成分を分解する。
  - ③ 通気・水分管理システムは、送風機で臭気ガスを装置内に供給し、微生物が活発に働けるように安定した水分量を充填材に供給し管理している。

脱臭原理は、まず臭気ガスを装置内の充填材に通過させる。次に充填材を通過する際に臭気ガス成分が充填材表面の水分に溶解・除去され、清浄な空気が装置上部から排出される。最後に充填材表面に付着した臭気成分が充填材内の微生物の代謝作用により分解される。このサイクルが繰り返されることで化学薬品を使わずに自然な微生物プロセスで脱臭処理を行っている。

また、一般的な生物脱臭装置の線速度 (LV) は 0.1 ~ 0.3 m/s、空間速度 (SV) が 200 ~ 500 1/h で設計されていることが多いため、装置が大型化してしまい、大風量化への対応を難しくしている要因となっている<sup>4)</sup>。

そこで当社では従来の充填式生物脱臭法の機構に改良を加え、大風量化と省スペース化を可能とした新たな脱臭方式を検討し、食品残渣堆肥化プラント内で実施した実証試験から有意な成果が得られたため、試験結果と今後の展望について報告する。

## 2. 食品残渣堆肥化プラントの脱臭装置仕様

### 2.1 対象臭気成分

本開発では、食品残渣の堆肥化を行う企業より臭気対策の相談を受け検討を開始した。この企業のプラントでは、既に一般的な充填塔式生物脱臭装置が稼働しているものの、処理風量がプラントに対して不足しているため、新たに増設する形での依頼となった。プラント内の臭気ガスの主成分については、現地調査した結果、Table 1 に示すように酪酸、アンモニアの 2 成分であることが判明した。これらの成分は一般的な食品残渣堆肥化プラントから発生する成分と一致しているため、十分

に生物脱臭装置で対応可能と考えられる。

Table 1 Measurement results of odorous components in a compost plant

Odorous component	Concentration	Odor intensity
Butyric acid	429 ppb	Over 5
Ammonia	50 ppm	Over 5

注視すべきは、臭気強度 5 を大幅に超える濃度の酪酸が工場内に存在する点であり、酪酸は嗅覚閾値が非常に低いため、工場から外部にわずかな量でも未処理で排出されると臭気問題に発展する可能性がある。そのため、特段の対応が求められることが大きな課題である。

### 2.2 処理風量

今回のプラントに増設される脱臭装置の処理風量の設定根拠としては、以下の 3 点である。

- ① 夏場のプラント内の暑熱対策。
- ② 食品残渣から発生する水分の外部排出。
- ③ 容積 5400 m<sup>3</sup> のプラント内を陰圧に保つ。

これらを考慮し、客先より 300 m<sup>3</sup>/分の処理風量を要求された。脱臭装置の設置面積に制約を受けることもあり、一般的な生物脱臭装置では 300 m<sup>3</sup>/分の処理風量を達成することは難しいため、発泡体仕様の選定と散布水の改良が余儀なくされた。

スクラバー等では散布水には薬液が用いられるが、生物脱臭装置の散布水は、微生物への影響と使用済み薬液の処理費用が高額になる点から、一般的に地下水が用いられる。こうした背景の中、我々は生物脱臭装置を高機能化する要素として、酵素のもつ成分分解作用に着目し、酵素を含む生成水 (以下、酵素水とする) を散布水に採用することとした。

### 2.3 酵素の活用

酵素は一般的に以下の特徴を有している<sup>5)</sup>。

- ① 構成成分はタンパク質である。
- ② 最適な温度、pH が存在し、不適切な条件だと壊れる (失活)。
- ③ 化学反応に必要なエネルギー値を下げて、反応を促進する (触媒)。
- ④ 酵素自体は化学反応前後で変化しない。
- ⑤ 酵素の種類ごとに反応する物質 (基質) が決まっている (基質特異性)。
- ⑥ 酵素は一つの化学反応しか触媒作用をしない (反応特異性)。
- ⑦ 現在、発見されている酵素は数千種類以上。

これらの酵素の特徴を生物脱臭装置と組み合わせることで、以下の効果により脱臭装置の高機能化が期待できると考えている。

- A) 水中の臭気成分 (有機物) を低分子化合物に消化  
 B) 脱臭を阻害する物質への対応強化  
 C) バクテリアの活動促進

## 2.4 酵素水生成装置

対象臭気ガス成分により好相性の微生物の種類が変わることから、酵素についても微生物及び対象臭気に対する好相性の酵素を供給する必要がある。そのため、酵素水は、臭気ガス成分と同じ成分を含む汚水を原水として生成を行う必要があり、現場近くで酵素水の生成を行っている。今回使用した酵素水生成装置の構成と生成された酵素水を Fig. 2 に示す。酵素水生成装置は、調整槽、第一曝気槽、第二曝気槽、沈殿槽、貯槽から構成される。調整槽及び第一曝気槽、第二曝気槽については、嫌気性ガスの発生抑制および好気性菌の促進のために、常時曝気を実施している。

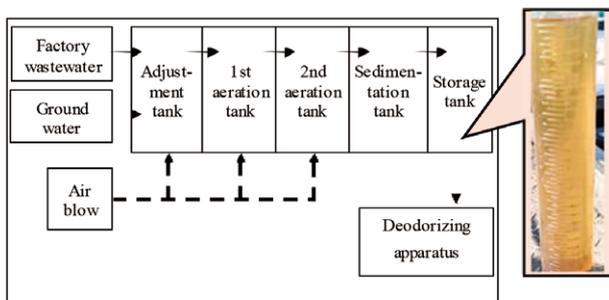


Fig. 2 Diagram of enzyme water generating apparatus and enzyme water.

酵素の原料となる原水については、今回プラント内部の工場汚水を活用し、BOD 値が 1000 mg/L 以下になるように調整し、2 時間おきに 100 ~ 200 L の量を調整槽に供給する。この供給により調整槽から第一曝気槽には、同量の水がオーバーフローされて供給される。同様に第一曝気槽から第二曝気槽、第二曝気槽から沈殿槽、沈殿槽から貯槽にと、順にオーバーフローされていく仕組みとなっている。

各槽の容積は、調整槽: 2.4 m<sup>3</sup>、第一曝気槽、第二曝気槽: 7.9 m<sup>3</sup>、沈殿槽: 0.7 m<sup>3</sup>、貯槽: 0.4 m<sup>3</sup> となっており、滞留時間により各槽での処理時間が調整されている。このようにして生成された酵素水が脱臭装置内に約 2 m<sup>3</sup>/日の量で供給されていく。

Fig. 2 に示すように、酵素水自体は茶色の透明な液体であり、pH 6~8 の間で管理されている。

この酵素水が脱臭装置内の充填材に、連続的あるいは間欠的に補給され、微生物生育および代謝生成物の洗い流しに寄与していると考えられる。

次章より今回生成した酵素水の実際の効果について検証した結果を詳細に報告する。

## 3. 酵素水の効果の検証

### 3.1. ラボにおける酵素水の性能比較

生成された酵素水の効果について、まずラボ試験で地下水条件と比較した。ラボ試験で実施した充填材通気試験の試験条件を Table 2 に示し、概略図を Fig. 3 に示す。充填材には両条件共に 5 ~ 10 mm 仕様の発泡ガラスを使用し、試験装置下部の水槽に試験溶液を 10 L 溜めた状態で実施した。

Table 2 Laboratory test conditions

Test solution	Ground water or Enzyme water
Filler	Glass blowing agent
Filler height [cm]	40
LV, linear velocity [m/s]	0.2
Water tank capacity [L]	10
Watering amount [L/min]	1.5

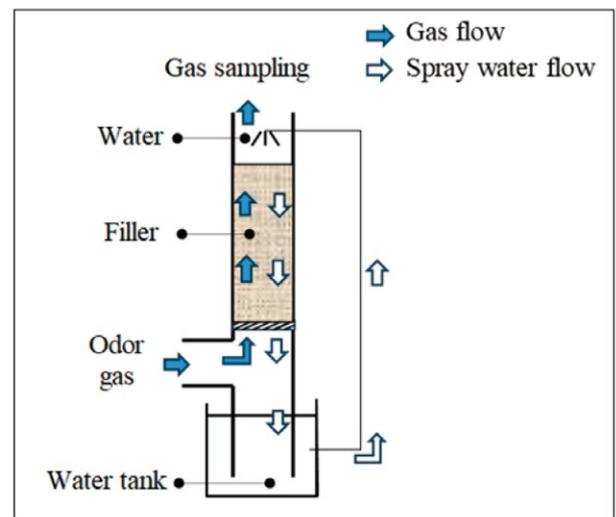


Fig. 3 Diagram of laboratory test for butyric acid removal rate.

地下水および酵素水をそれぞれ散布水とした条件で試験を行い、8 日間臭気ガスを充填材に通気させながら、出口臭気をミニポンプ (柴田科学製 MP-Σ 500) で捕集管に 20 L (4 L/分×5 分) 捕集し、GC-FID (島津製作所製 GC-2014) を用いてアルカリビーズ法で分析、酪酸除去性能を比較した経時変化結果を Fig. 4 に示す。

試験初期から酵素水は地下水より高い除去性能であり、酵素水に酪酸の除去効果があることが示されている。酵素水条件が 2 日目以降から性能が向上した理由は、試験開始時は発泡体に菌及び酵素が十分に定着しておらず、発泡体間の隙間が大きく、ガスが発泡体に接触せずに通過していった結果と考えられる。

地下水条件は 4 日目までは溶液への吸着容量が確保されていたため、性能を維持できていたものの、8 日目では吸着した酪酸が分解できていないため、吸着破過し、除去率低下が示され、それ以降は下降の推移となっ

た。これに対し、酵素水は継続して高い除去性能を維持した。

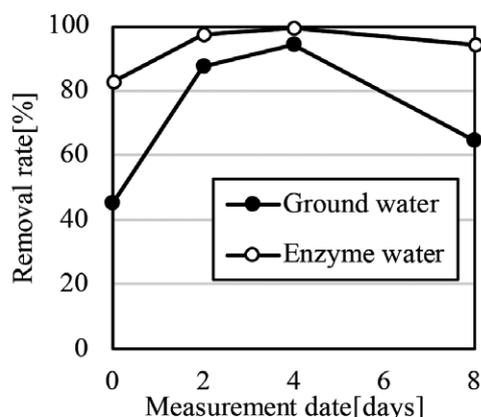


Fig. 4 The laboratory test results for butyric acid removal rate.

### 3.2 酵素水の効能評価

次に酵素水による酪酸の分解効果について検証した。地下水 (G.W.) および酵素水 (E.W.) にそれぞれ酪酸試薬を加え、酪酸濃度を 400 mg/L に調整した試験溶液をそれぞれインピンジャーに 5 mL 採取する。Fig. 5 に示すようにミニポンプ (柴田科学製 MP-Σ 500)、捕集管、インピンジャーの順に連結し 2 L/min で吸引し、バブリングで揮発したガスを捕集管に 5 L 捕集させ、GC-FID (島津製作所製 GC-2014) を用いてアルカリビーズ法で分析した。

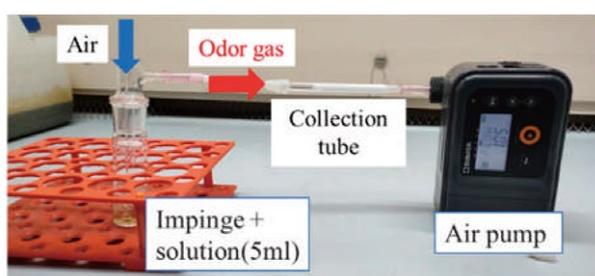


Fig.5 Diagram of laboratory test for butyric acid decomposition.

試験結果を Table 3 に示す。ガスクロマトグラフィの結果では、地下水条件では揮発したガスから酪酸が臭気強度 5 以上の高濃度で検出されていることに対し、酵素水条件では、臭気強度 3.5 程度の低濃度の揮発に抑制されている。さらに酪酸試薬混合直後の各試料の pH は、地下水条件は pH 5 以下に低下するのに対し、酵素水条件では pH 7~8 とほとんど変化がない結果となった。この結果から酵素水は酪酸に対し、瞬時に分解作用を示しているため、臭気抑制に有効であることが示された。

Table 3. The laboratory test results for butyric acid decomposition

Sample	Solvent	Gas Conc. [ppb]	Odor Intensity [-]
#1	G.W.	1447.8	Over 5
#2	G.W.	756.9	Over 5
#3	E.W.	6.3	3.5
#4	E.W.	6.4	3.5

### 3.3 実証段階での評価

次に、実証試験における酪酸の除去性能を Fig. 6 に示す。運転開始初期は、地下水および酵素水ともに高い除去性能を示すが、地下水は早い段階から除去性能の低下がみられ、30日時点の除去率は 30% と大幅に悪化した。ラボ試験同様に、地下水条件では、微生物による酪酸の分解速度が工場内から送られてくる量に追いつかず、溶解量が飽和状態となり、脱臭性能が悪化する結果が示された。

一方、酵素水は酵素による酪酸分解によって、40日時点でも高い除去率を維持しており、脱臭効果が有効に機能しているといえる。

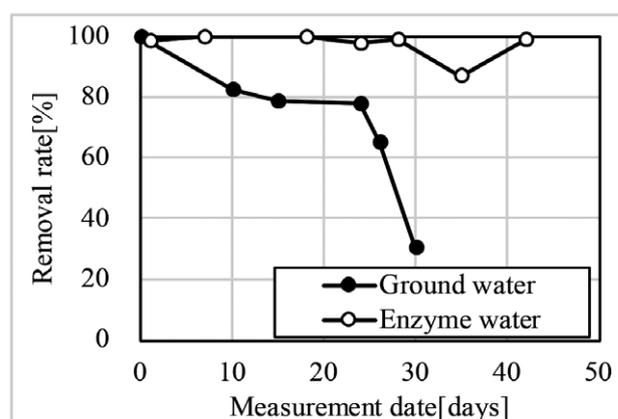


Fig. 6 The results of butyric acid removal rate in demonstration test.

## 4. 充填材の選定

### 4.1 発泡ガラス

充填塔式脱臭装置において、微生物の支持、水分の保持、ガス流路の保持および均一化が重要であり、それらを担う物理的に安定な充填材が必要である。候補は、プラスチック、セラミック、天然素材、無機材料等様々であり、今回は前記条件を満たし低コストかつ多孔質で表面積が確保可能な発泡ガラス (村上開明堂製バブグラス®) を採用した。

### 4.2 粒径について

大風量処理および効率よいガス接触を満たす発泡ガラスの粒径サイズの候補の検討を実施した。

気液接触面積が広くなれば除去性能は高くなると想定し、5-10 mm 仕様の発泡ガラスを検証した。ラボ試

験及び実証試験において、この発泡ガラスを用いることで高効率の除去性能を示した。ところが、長期間実証実験を行うと、工場からの粉塵や好気性細菌によるバイオフィルムの形成により、充填材層が密となり、充填材の通気性が悪化し、装置圧力が増大し、風量低下する問題が発生した。Fig. 7はバイオフィルムで流路が制限され、局所的に著しく流量が上昇したことにより発泡ガラスの層に穴が生じた一例であり、この穴を通して臭気ガスが未処理で排出されるトラブルに見舞われた。そのため、圧力損失が低く、バイオフィルム等により充填材間隔が詰まりにくい仕様を再検討した。

これらを解決する手段として有効な方法は発泡ガラスの粒径を大きくすることであると考え、10-20 mm 仕様に変更した性能比較を実施した。ラボ試験では、発泡ガラスに散水したアンモニアのワンパス除去性能の時間経過を測定することで充填材の適正について検証した。結果を Fig. 8 に示す。

5-10 mm 仕様においては、散水後 20 分経過時でも高いアンモニア除去性能を示した。対して、10-20 mm 仕様においては、10 分までは 100% 近い除去性能を示すものの、20 分経過時に 80% まで低下する結果が示された。これは、通気により発泡ガラス表面の水に対するアンモニアの吸着能力が低下しているためであり、高い脱臭性能を回復、維持するためには、新たに散水する必要がある。この点から、通常 5-10 mm では一時間から二時間の間隔で散水を行うことで性能の維持が可能であるが、10-20 mm 仕様では 20 分間隔で散水を行う制約がある結果となった。

また圧力損失について、5-10 mm 仕様では、初期圧力は LV 値 0.2 m/s 時に 500 Pa であるが、使用していくうちに 1000 Pa を超える圧力損失に推移していくため、処理風量が最大で 250 m<sup>3</sup>/分しか達成できない課題があったものの、10-20 mm 仕様では初期圧力が 200 Pa 程度で、経時変化後でも 800 Pa 程度に抑制できる結果が示されたことから、散水条件と発泡体仕様を見直すことで目標とする設定風量である 300 m<sup>3</sup>/分が達成できる見込みが立つ結果となった。



Fig. 7 The photo of hole in filler layer at demonstration test.

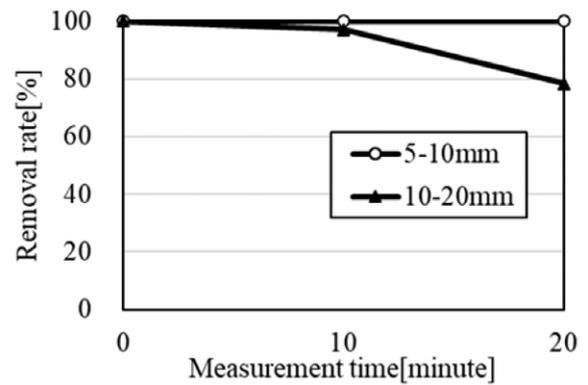


Fig. 8 The laboratory test results for ammonia removal rate.

## 5. 実証モデル

今回、リサイクルプラントに新たに増設された実証モデルを Fig. 9 に示す。このモデルの仕様については Table 4 に示す。



Fig. 9 The photo of the demonstration model.

Table 4 The specifications of the demonstration model

Material	SUS304
Size [m]	2.1 × 10.7 × 3.5
Filler	Glass blowing agent
Filler volume [m <sup>3</sup> ]	10
Spraying water	Enzyme water
Water tank capacity [m <sup>3</sup> ]	11
Spraying water volume [L/min]	180
Air flow volume, Q [m <sup>3</sup> /min]	250~300
Linear velocity, LV [m/s]	0.2~0.24
Space velocity, SV [1/hour]	1440~1800

実証モデルの仕様について、同プラント内で稼働している一般的な充填塔式生物脱臭装置 (処理風量 50 m<sup>3</sup>/分程度) を比較の指標とする。

LV 値については、既設の生物脱臭装置の 0.07 m/s に比べて、2 倍以上の数値設定ができており、SV 値についても既設の 170 1/h に比べて、10 倍近い値で設計が可能となり、装置のコンパクト化が実現できる結果となった。

また、この実証モデルを稼働した現場での脱臭性能の一例を Table 5 に示す。装置入口 (工場内部) の臭気

は、事前調査同様に酪酸、アンモニア共に臭気強度 5 近くの濃度が検出される結果であるが、装置出口部では、両臭気共に大幅に低減される結果が示された。現状、出口部での臭気強度は 3.5 以下が求められているため、脱臭性能の目標を達成できたことが確認された。

今回の開発において重要ポイントであった酵素水の活用及び充填材の仕様の最適化が装置の設計にうまく反映できた結果と考えられる。

Table 5 Measurement results of odorous components of the demonstration model

Odorous component	Concentration (Odor intensity)	
	Inlet	Outlet
Butyric acid	145 ppb <b>(Over 5)</b>	1.2 ppb (2.6)
Ammonia	25 ppm (4.7)	4 ppm (3.4)

## 6. 結論

本検討で得られた結果を以下に要約する。

- 1) 本構成の生物脱臭装置は、当該堆肥化プラントにおいて十分な脱臭性能を示した。
- 2) 今回導入設備の生成水（酵素水）は、酪酸に対して即効性のある除去性能を有することを確認した。
- 3) 充填担体に発泡ガラス（粒子径 10-20 mm）、酵素水を組み合わせることで気液接触時間は一般的な仕様と比べ短くすることができる。すなわち、敷地面積の少スペース化に伴う LV 値増にも対応できる。これにより、高い SV 値での設計が可能となり、充填材量を削減することが可能になることで、圧力損失を低減でき、大風量化への対応が可能となった。
- 4) 食物残渣堆肥化プラントは堆肥化に使用される原料が日々異なり、発生する臭気成分、濃度も一定ではない。そのため、強い臭気が発生した場合、一時的ではあるが除去不十分な状態で臭気が大気に排出される懸念は残る。

## 7. 今後の展望

今後の展望として、同様の堆肥化プラントにも本構成の生物脱臭装置が適用可能かを検証し、新たな市場展開を模索するとともに、今回取り上げた臭気成分以外（特に硫化物系）に対する酵素水を活用した脱臭性能も明らかにしていきたい。

## 参考文献

- 1) 消費者庁 HP 令和 4 (2022) 年度食品ロス量推計値の公表
- 2) 染谷孝：廃棄物資源循環学会誌 32.6 (2021), 409-418
- 3) 環境省 HP ひと目で分かる「脱臭装置」選択ガイド <https://www.env.go.jp/content/900397592.pdf>
- 4) 樋口能士：環境技術 24.10 (1995), 581-587
- 5) 中森茂：技術の系統化調査報告 14 (2009), 139-183