

土壌脱臭法の実用化のための実験的検討

鈴木 典子・平野 譲・猪股 律子*

Keywords: 悪臭対策; 微生物脱臭; 土壌脱臭法.

1 はじめに

下水処理施設、畜産関連施設等から発生する悪臭の防止対策には、従来各種薬剤による洗浄処理や活性炭による吸着処理等の物理化学的処理が一般的に用いられてきた。最近では悪臭物質を微生物で分解する生物脱臭技術の研究開発が進んでいる。

この中でもランニングコストが安価で、比較的維持管理が容易で廃棄物の発生量が少ない等の利点から、土壌脱臭施設や微生物を高密度に保持できる各種充填材を用いた生物脱臭施設が注目をあびている¹⁻³⁾。特に土壌脱臭法は設備費が最も安価であるが、処理効率の不安定感、積雪地域における冬季間の管理の困難性等の懸念から新潟県内での普及は少ない。

そこで、土壌脱臭法の処理効果の確認、処理能力の試算及び積雪地域における管理上の問題点等をそれぞれ実験検討し、悪臭苦情対応や下水処理場等の脱臭方法の一方法としての土壌脱臭法の活用可能性について検討した。

2 方 法

2.1 カラム実験

2.1.1 脱臭効果と長期安定性の確認

実験装置は図1の概略図のとおり組み立て、エアープンプにより悪臭物質混合空気を土壌カラムの下から押込むかたちとした。使用した悪臭物質は下水処理場などから発生する主な悪臭物質⁴⁾である硫化水素、メチルメルカプタン及びアンモニアの3物質とし、表1の条件で通気した。脱臭層の土壌厚50cm、通気速度(LV)5~6mm/秒、通気ガス中の悪臭物質濃度の設定は文献や実際に稼働している土壌脱臭施設の設計値に従った⁵⁻⁶⁾。

実験に供した土壌は、脱臭効果が高いと言われている黒ぼく土⁷⁾と、黒ぼく土が入手困難な場合、設置現場の土壌が活用可能か検討するために畑土とし、それぞれにバーク堆肥を25%(W/W)混合した。

脱臭効果の確認は、脱臭層通過前後の通気ガス中の3物質濃度を検知管で測定し除去率を求めた。また、実験の最終日に官能試験法(新潟県告示1829号)により臭気濃度を測定した。

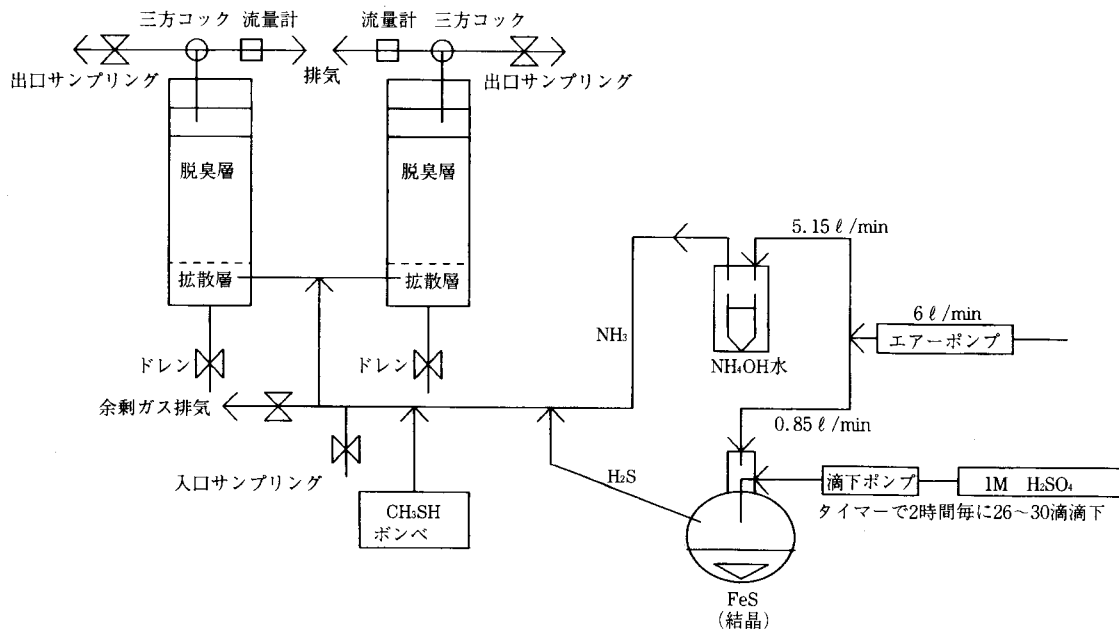


図1 カラム実験装置概略図

表1 カラム実験条件

カラム断面積	78.5cm ² (φ10cm)
土壌厚	50cm
通気量	3ℓ/min
通気速度 (LV)	5~6mm/sec
供試悪臭物質及び通気濃度	
硫化水素	10~100 ppm
アンモニア	10~100 ppm
メチルメルカプタン	0.1~2 ppm
悪臭物質の発生方法	
硫化水素	硫化鉄+1N硫酸
アンモニア	アンモニア水を3倍希釈
メチルメルカプタン	ガスボンベ
供試土壌	
No.1: 黒ぼく土 (75%) + バーク堆肥 (25%)	
No.2: 畑土 (75%) + バーク堆肥 (25%)	
測定方法	検知管法・官能試験法

表2 通気日数

悪臭物質	黒ぼく土	畑土
硫化水素	383日	356日
アンモニア	383日	356日
メチルメルカプタン	359日	334日

表3 通気条件と最大処理濃度

土壌厚 cm	通 気 条 件						最大処理濃度 ppm
	通気量 ℓ/min	通気ガス量 m ³ /h	土壌量 ×10 ⁻³ m ³	通気速度 (LV) mm/sec	空間速度 (SV) m ³ /m ³ ・h	滞留時 sec	
20	1.5	0.09	1.6	3.2	57	63	140
20	3.0	0.18	1.6	6.4	115	31	50
20	4.5	0.27	1.6	9.6	172	21	38
30	1.5	0.09	2.4	3.2	31	94	240
30	3.0	0.18	2.4	6.4	76	47	102
30	4.5	0.27	2.4	9.6	114	31	55
50	1.5	0.09	3.9	3.2	23	157	280
50	3.0	0.18	3.9	6.4	46	79	90
50	4.5	0.27	3.9	9.6	69	52	60

実験日数は表2のとおりである。この間、土壌の乾燥を防ぐために適宜注水したほかは特に管理は行わなかった。

2.1.2 硫化水素の処理能力の試算

処理能力を試算するため、2.1.1の実験で安定した処理効率を示した畑土（バーク堆肥25%混合）カラムを用いて土壌層厚を20cm, 30cm, 50cm, 通気速度を毎秒3.2mm, 6.4mm, 9.6mm とし、組合せにより9通りの通気条件を設定した。通気条件は表3に示した。このカラムに硫化水素を20~500ppmの濃度で通気し、検知管で脱臭層通過前後の濃度を測定し除去率を求めた。また、土壌厚と通気速度から滞留時間と空間速度（SV：単位容積当りの処理ガス量）を求め、土壌層出口から硫化水素が検出されない時の入口濃度の最大値との関係を解析した。

なお、供試土壌は20ppm 前後の硫化水素を11~62日以上通気し十分馴致養生したものを用いた。

2.2 屋外実験

新潟県内の下水処理場で図2に示した土壌脱臭施設を設置し、汚泥濃縮槽から発生する悪臭を通気し、処理効率と維持管理上の問題点を検討した。

土壌脱臭装置の設計仕様及び脱臭層土壌の性状は表4に示す。

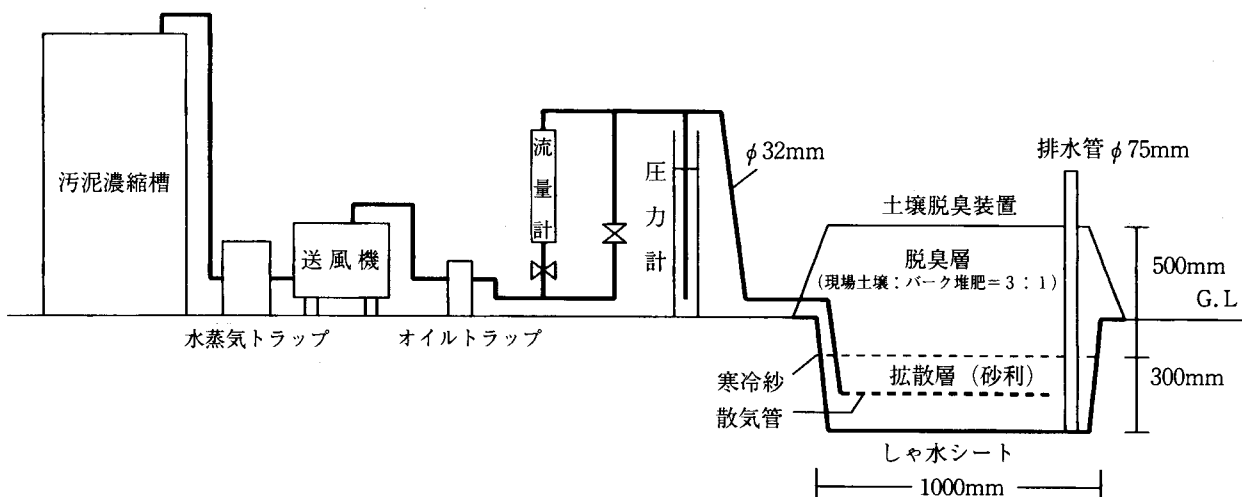


図2 土壌脱臭処理装置構造図

表4 土壤脱臭装置の設計仕様

面積	1 m ² (1m×1m)
土壤厚	50 cm
処理ガス量	320 l/min
LV	5.3 mm/sec
SV	38 m ³ /m ² ·h
滞留時間	94 sec
脱臭層	現地土壤：パーク堆肥=75%：25%
土壤の性状	土質 砂質土
	pH (H ₂ O) 6.3
	pH (KCl) 5.0
	T-N 0.07% - dry
	T-C 0.72% - dry
	EC 27 μs/cm

脱臭効果の確認は、各季節毎に年4回原臭及び処理臭中の臭気濃度を測定し除去率を求めた。

試料は原臭は排水管から、処理臭は脱臭層の土壤表面にロートを伏せ、ミニポンプでテドラーバックに採取した。

土壤脱臭装置の維持管理のうち、配管・脱臭層の破損等の有無、通気流量・通気抵抗の異常の確認、水蒸気トラップの水抜き等は毎日行った。送風機の油交換、脱臭層底部の雨水排水作業、脱臭層温度、通気流量及び抵抗の測定は原則として月1回実施した。

3 結果と考察

3.1 カラム実験結果

3.1.1 脱臭効果と長期安定性の確認

悪臭物質の脱臭層入口の濃度と脱臭層による除去率を図3～図5に示す。硫化水素の入口濃度は8～105ppmで、黒ぼく土の除去率は92～99%以上、畑土は97～99%以上、アンモニアの入口濃度は7～80ppmで、黒ぼく土の除去率は86～99%以上、畑土は97～99%以上で良好に除去された。メチルメルカプタンの入口濃度は1.2～2ppmで、除去率は黒ぼく土が30～95%以上と多少ばらつきが見られたが概ね90%以上除去率された。畑土は92%以上～95%以上と良好な結果となった。

なお、100～150日で3物質とも黒ぼく土で除去率が低下したが、理由は明らかでない。

また、臭気濃度は脱臭層入口の98,000に対して出口では黒ぼく土が4,100、畑土が230であった。これを新潟県生活環境の保全に関する条例（以下「県条例」という）に基づく悪臭の規制基準と比較すると、黒ぼく土は第三種区域の排出口の規制基準より高くなったが、実験に用いた源臭物質の臭気の質とは明らかに異なり、カラム内で別の物質が生成された可能性が考えられた。畑土は第一種区域の排出口規制基準を十分満足することができた。

この結果、土壤脱臭法は長期間にわたり比較的容易に悪臭物質の除去が可能と考えられた。

なお、本実験で認められた脱臭効果は、土壤微生物による生分解のほかに土壤粒子による吸着による除去が考えら

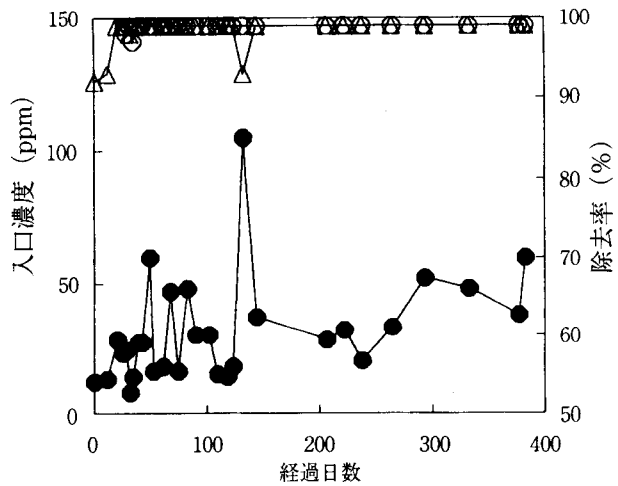


図3 硫化水素の入口濃度と除去率

●入口濃度 △黒ぼく土除去率 ○畑土除去率

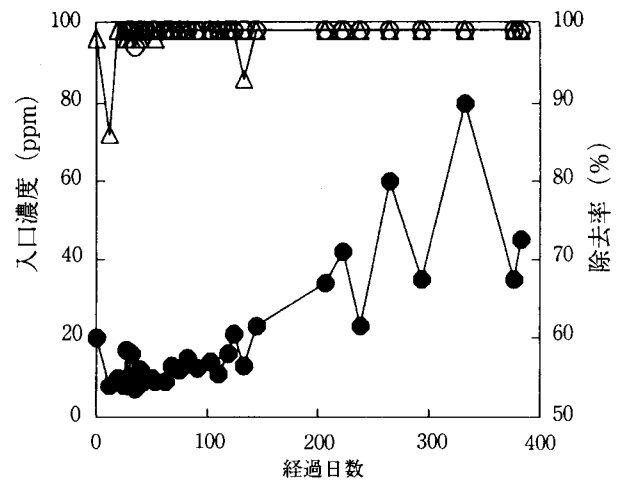


図4 アンモニアの入口濃度と除去率

●入口濃度 △黒ぼく土除去率 ○畑土除去率

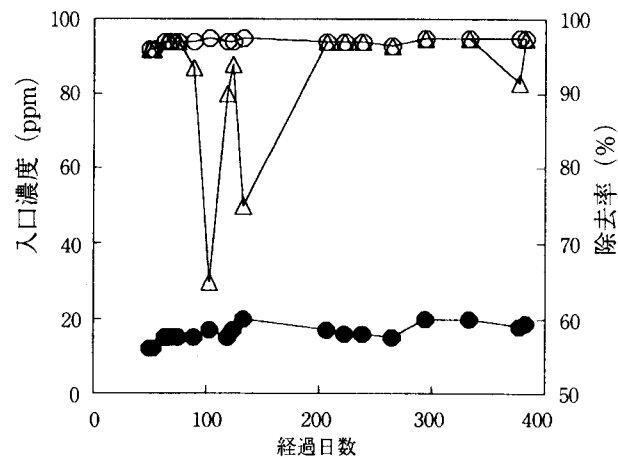


図5 メチルカプタンの入口濃度と除去率

●入口濃度 △黒ぼく土除去率 ○畑土除去率

表5 硫化水素の土壌厚別・通気速度別の脱臭実験結果

LV (mm/sec)	土壌厚	20cm	30cm	50cm
3.2	入口 (ppm)	50-320	41-300	18-500
	出口 (ppm)	<0.1-22	<0.1-2	<0.1-5
	除去率 (%)	93->99	99->99	99->99
	検体数	6	8	7
6.4	入口 (ppm)	50-400	48-320	45-400
	出口 (ppm)	<0.1-98	<0.1-60	<0.1-40
	除去率 (%)	68->99	81->99	89->99
	検体数	7	10	8
9.6	入口 (ppm)	7-350	41-410	30-500
	出口 (ppm)	<0.1-180	<0.1-220	<0.1-170
	除去率 (%)	43->99	46->99	66->99
	検体数	17	11	11

れる。この吸着除去を実験的に確認するには、本実験装置と同じ装置を無菌的に組立て、かつ維持する必要があるが技術的に困難と判断し、吸着除去実験は行わなかった。

また、福山は¹⁾硫化水素の生分解で硫酸が生成し、ドレン水のpHが2~3に低下すると報告しているが、本実験では大きな低下は見られず畑土でpH5程度であった。

3.1.2 硫化水素の処理能力の試算

実験結果の一覧を表5に、また、入口濃度と出口濃度の関係を、土壌厚別、通気速度別に除去率と重ねて図6に示す。いずれの条件でも、入口濃度が低濃度の場合には99%以上除去されたが、高濃度になると土壌厚が薄い程、通気速度が速い程除去率が低下した。通気速度3.2mm/秒では土壌厚20cmで93~99%以上、土壌厚30cmと50cmでは99~99%以上の除去率が得られた。通気速度6.4mm/秒では土壌厚20cmで68~99%以上であったが、入口濃度が50ppmを超えると出口から検出された。土壌厚30cmと50cmでは80%以上除去されたが土壌厚30cmでは100ppmを超えると出口から検出された。通気速度9.6mm/秒ではいずれも入口濃度が50ppm程度では99%以上除去されたが、50ppmを超えると急激に除去率が低下した。

次に、出口から硫化水素が検出されなかった(0.1ppm未満)ときの入口濃度、即ち除去率が99%以上となったときの最大値を各通気条件毎の最大処理濃度とし表3に示した。最大処理濃度が最も低かった条件は土壌厚20cm、通気速度9.6mm/秒、空間速度172m³/m³・h、滞留時間21秒で処理濃度が38ppm、一方最も高かった条件は、土壌厚50cm、通気速度3.2mm/秒、空間速度23m³/m³・h、滞留時間160秒で処理濃度280ppmとなり、滞留時間が長くなると、また空間速度が小さくなると最大処理濃度が高くなった。

最大処理濃度と滞留時間及び空間速度の関係を図7、図8であらわした。これによると、最大処理濃度は滞留時間と相関が高く、相関式は $y=1.90 X^{-4.45}$ (X: 滞留時間, y: 最大処理濃度) で相関係数は0.918となった。また、最大処理濃度と空間速度は対数で相関が高く、相関式 $\log y = -1.01 \log x + 3.80$ (x: 空間速度, y: 最大処理濃度),

相関係数は0.937が得られた。そこで、処理する悪臭ガスの硫化水素濃度を測定し、2つの相関式にあてはめれば滞留時間と空間速度が求めることができ、設置すべき脱臭装置の規模を試算することが可能と考える。

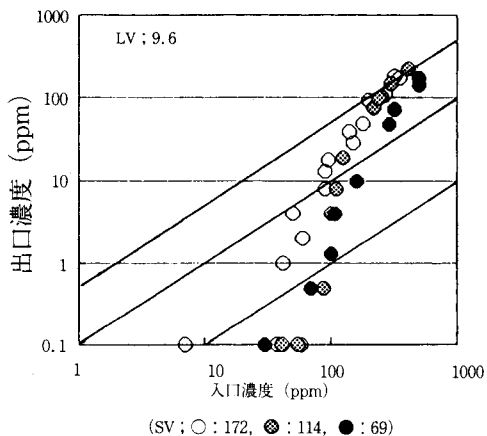
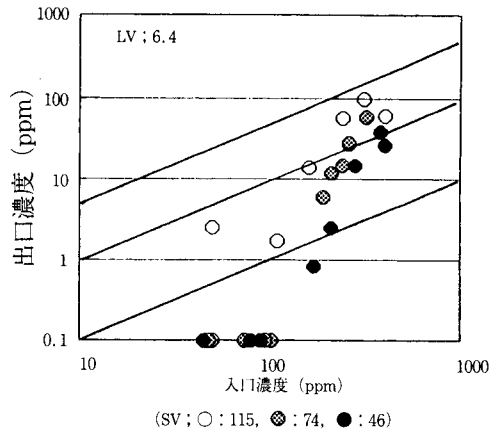
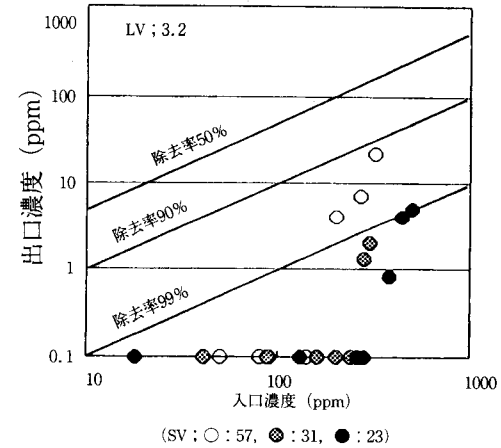


図6 土壌厚、通気速度と入口出口濃度の関係
○20cm, ◐30cm, ●50cm

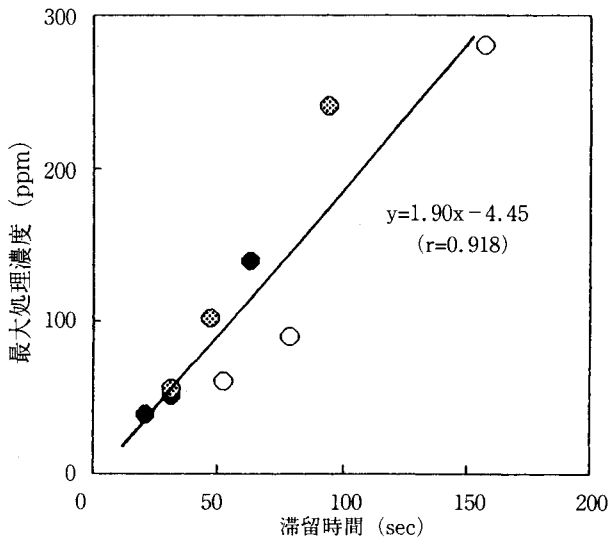


図7 滞留時間と最大処理濃度

● 土壌厚20cm ⊗ 土壌厚30cm ○ 土壌厚50cm

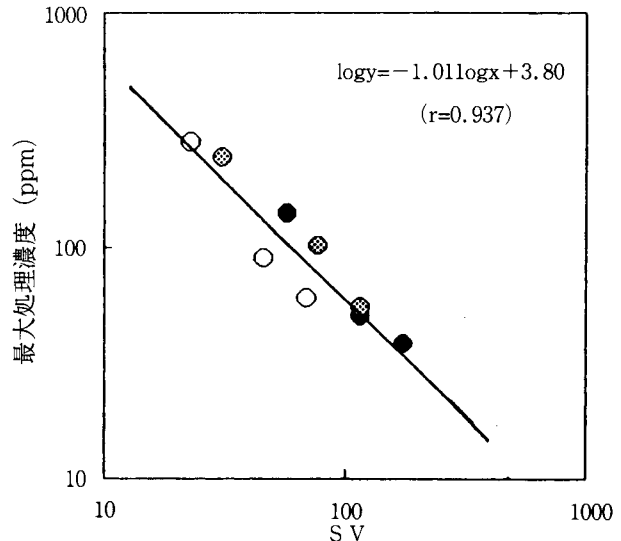


図8 SVと最大処理濃度

● 土壌厚20cm ⊗ 土壌厚30cm ○ 土壌厚50cm

表6 土壌脱臭装置の脱臭効率試験結果

調査年月日	臭 気 濃 度		除 去 率 (%)
	処 理 前	処 理 後	
1995. 10. 23	1,700	55	96.8
1995. 12. 14	-	-	-
1996. 2. 21	550	<10	>98.2
1996. 5. 24	5,500	170	96.9
1996. 7. 10	>55,000	550	>99.0
範 囲	550~	<10~	96.8~
	>55,000	550	>99.0
平 均 値	16,000	200	98.8

3.2 屋外実験

3.2.1 脱臭効果

脱臭処理前、処理後の臭気濃度と除去率を表6に示す。臭気濃度は各季節毎に4回測定したが、処理前が550~55,000以上、平均16,000で処理後は10以下~550、平均200で除去率は96.8~99.0%以上と良好な結果が得られた。処理前の臭気濃度が最大となった季節は夏季(7月10日)の55,000以上で検知管で測定した硫化水素濃度は14ppmであった。この時の処理後の臭気濃度は550で処理後の濃度で最も高くなったが、臭気の種類は土壌臭で下水臭は感じられなかった。一方最も低かった季節は冬季(2月21日)で処理前が550、処理後が10以下であった。

処理後の臭気濃度はすべて県条例に基づく気体排出口における規制基準の第一種区域の基準を満足するものであった。また、臭気の種類も処理前が下水臭であったのに対し処理後は土壌臭で、脱臭層の土壌面から悪臭が発生する等のトラブルも無く脱臭処理が十分に行われたものと考えられた。

3.2.2 維持管理結果

維持管理上の主なトラブルは実験開始直後に発生した送

風機からの油吐出で、これは水蒸気トラップとオイルトラップの設置により解決された。

処理流量は360 l/分で実験を開始したが、実験途中に送風機を更新したため、270 l/分に減少した。このため、当初通気速度5.3mm/秒、滞留時間94秒、空間速度38m³/m³・hで設計したが、実際には通気速度4.5~6mm/秒、滞留時間83~111秒、空間速度32~43m³/m³・hで運転されたものと考えられた。送風量は実験開始から終了まで所定の能力が確保された。

次に通気抵抗と脱臭層温度との関係を図9に示す。通気抵抗は実験開始直後の8月7日から12月まで20~55mm(Aq)で推移した。この間9月9日から10日に96mmの降水があり通気抵抗がこれまでの20~30mm(Aq)から50mm(Aq)とやや上昇したが特にめだった上昇もなく、

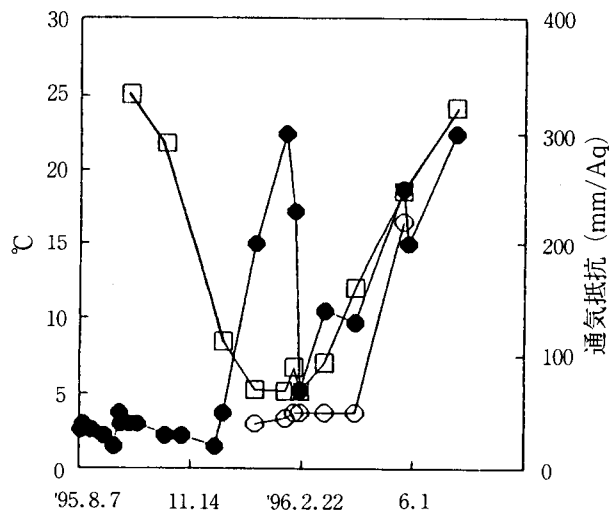


図9 脱臭層温度と通気抵抗

□ 脱臭温度 ● 水抜き前通気抵抗
○ 水抜き後通気抵抗

排水作業も不要であった。1996年1月以降は、70～300mm (Aq) に上昇したが、4月までは排水作業を行うことにより45～50mm (Aq) に低下した。

通気抵抗上昇の主な原因は降水によるといわれているが図9から脱臭層温度が高いと通気抵抗はあまり上昇せず、低下すると上昇している。これは脱臭層温度が高いと一時的に降水があっても土壌表面からの蒸発量が多くなるためと推測された。また、脱臭層温度が下がってくると土壌表面からの蒸発量が少なくなり、更に12月から2月にかけての降水や降雪の影響で土壌間隙水が多くなり、また拡散層にも水が溜まること等により通気抵抗が上昇したものと考えられる。

5月以降は排水作業後も通気抵抗が下がらず、7月には排水管に水が無くても300mm (Aq) に上昇した。原因は散気管が目詰まりしたもので、①実験開始初期に送風機のトラブルから油の吐出が何回か発生し、この油が散気管内に残留していた可能性があること、②冬季に排水管内に底部から40～50cmの高さで水が観察され、さらに排水管底部に砂泥が確認されたことから、脱臭層まで水が溜り土壌が拡散層まで流れた可能性があること、③点検の都度送風機を停止させたが、拡散層に水がある時はこの水が散気管内に逆流した可能性があること等から、散気管内及び周辺に油を含んだ濁水ができ、脱臭層温度の上昇により油と砂泥が散気口で乾固したものと推察された。これは、実験開始時に水蒸気トラップとオイルトラップを設置し、冬季間の排水作業を頻繁に行えば防ぐことができたと考えられる。

以上の結果から、排水作業は春から秋までの気温の高い時期は集中豪雨等よほどの降水がない限りほとんど不要であり、一方冬季間は通気抵抗の上昇を防ぎ、脱臭層を保護するため頻繁に排水作業を行う必要があり、これが土壌脱臭装置を管理する上で最も重要なことと考えられた。

次に気温と脱臭層温度等の関係を図10に示す。気温の低下に伴い処理ガス温度、脱臭層温度、周辺土壌温度とも低下し、12月から3月まで処理ガス温度は3.8～8.5℃、脱臭層温度は5.2～7.1℃と10℃を下回った。一般的に微生物は生息環境温度が10℃以下になると活性が低下すると言われているが、この期間において、特に脱臭効率の低下は認められなかった。なお、このことは冬季間処理ガス中の悪臭濃度が低かったことも原因している可能性もある。

脱臭層温度と周辺土壌温度の変化は、年間を通して脱臭層温度が1.8～4.1℃、平均で3℃高い。1月の下旬からの降雪で2月の点検時に脱臭層上にも積雪があったが、積雪深は周辺が35cmに対し14cmと少なかった。脱臭層温度と処理ガス温度の差は±2℃で平均温度はいずれも12.7℃で年間を通してほぼ同じ温度であることから、脱臭層温度は直接的には処理ガス温度をそのまま反映しており、冬季間汚泥濃縮槽から脱臭層までの配管の保温対策を行うことで脱臭層温度の低下を最小限することができると考えられる。

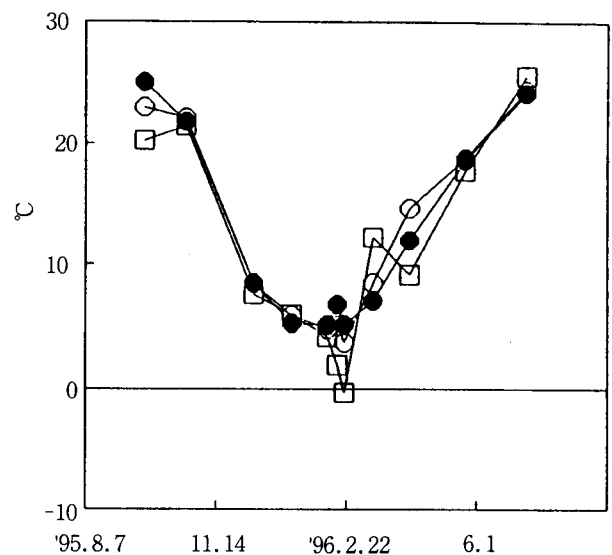


図10 気温の変化と処理ガス及び脱臭層温度
□ 気温 ○ 処理ガス温度 ● 脱臭層温度

4 ま と め

土壌脱臭法の処理効果の確認と処理能力の試算及び屋外設置に伴う管理上の問題点等を把握し、簡易な脱臭方法の一つとして積雪地域でも実用可能を検討するため、カラム実験及び下水処理場で屋外実験を行った。その結果、次のことがわかった。

- 1) カラム実験から土壌脱臭法は硫化窒素、アンモニア、メチルメルカプタンの処理に長期間効果があることが確認された。また、バーク堆肥を土壌に混合することで、黒ぼく土以外の土壌でも脱臭層として活用できた。
- 2) 土壌厚、通気速度及び通気濃度を変えてカラム実験を行いそれぞれの条件毎に硫化水素の最大処理濃度を求めた。結果は38～280ppmで、土壌が厚い程また通気速度が遅い程最大処理濃度が高く、最大処理濃度と滞留時間には正の相関が、空間速度とは対数で相関が認められた。
- 3) 屋外実験結果から、土壌脱臭法は本県のような積雪地域においても、下水処理場等から発生する複合悪臭に十分対応できるものであることが確認された。
- 4) 積雪寒冷地域に土壌脱臭装置を設置し管理していく上で最大の課題は、冬季間の排水対策である。排水が不十分であると脱臭層に水が溜り通気抵抗の上昇や脱臭層の破損等の原因になる可能性がある。しかし、冬季以外は脱臭層温度が20～30℃前後あれば土壌表面からの蒸発量が多く、集中豪雨等を除き排水作業は不要である。

文 献

- 1) 福山 丈二：生物脱臭の概説，臭気の研究，24，129 (1993)。
- 2) 樋口 能士：生物脱臭法の現状と課題，環境技術，24，

- 581 (1995).
- 3) 大迫 政浩, 樋口 能士, 田中 勝: アンケート調査にもとづく生物脱臭法の技術的評価 (その1), 臭気の研究, **25**, 186 (1994).
- 4) 高橋 正宏: 下水処理場の臭気問題の現状, 臭気の研究, **25**, 1 (1994).
- 5) 細川 和範, 加藤 隆夫, 新井 徹, 豊嶋 真広: 横浜市における土壌脱臭施設の調査報告, 下水道協会誌, **25**, 7 (1988).
- 6) 石川 洋二, 杉本 英夫, 溝田 陽子, 辻 博和: マサ土を活用した土壌脱臭, 大林組技術研究所報, **53**, 121 (1996).