家畜家禽生産における悪臭の発生とその防止

小林茂樹

Outbreak of Offensive Odours in Animal Production and Systems for their Suppression

Shigeki KOBAYASHI

1 はじめに

家畜家禽生産から排出される糞尿は、本来は農地に還元され、土壌の物理性、化学性および生物活性を高めるために、有効利用されるべきものである。しかし、家畜家禽生産の規模が拡大され、排出する糞尿を個別の生産者あるいはその周辺で農地還元することが困難となってくるに伴い、その処理・利用は生産者にとって最も重要な経営上の課題となってきた。

家畜家禽生産においては、この糞尿の処理・利用と同時に、悪臭防止も重要課題となっている。糞尿処理・利用の円滑な遂行下にあっても、糞尿の悪臭はその処理施設や畜舎から発生し、近隣住民ばかりでなく、作業従業者自身にとっても憂鬱であり、健康にも良くないであろう。

昨今では、畜舎、堆肥場、污水处理施設、化学工場、食品加工工場等から発生する悪臭の防止のために、微生物製剤や化学製剤が開発され、販売されている。本稿では、特に家畜家禽生産に由来する悪臭発生とその防止に焦点を絞り、概要を述べる。

2 家畜・家禽糞尿悪臭の発生機序

悪臭成分および濃度の規制については、次項の悪臭防止法¹⁾の中で詳述するが、家畜・家禽由来の悪臭は主にアンモニア (NH_3)、チオール ($-\text{SH}$) および短鎖脂肪酸の3種である^{2),3)}。これらの悪臭物質は、摂取飼料の未吸収残渣が腸内微生物により分解され、糞便中に残存したものであり、飼料成分の中でも特に蛋白質が主要な原因物質となっている。

悪臭成分の発生に関して、スティックランド反応 (Stickland reaction) が知られている²⁾。これは、2種のアミノ酸相互間の嫌気的な酸化還元反応であり、*Clostridium* 属等の細菌の酵素の触媒による。すなわち、NAD (Nicotinamide adenine dinucleotide) の介在により、アラニン、ロイシン、バリン、セリン、グルタミン酸、フェニルアラニン等のアミノ酸は水素供与体として働き、グリシン、プロリン、アルギニン、トリプトファン等のアミノ酸は水素受容体として働く。

前者、すなわち水素供与体として働いたアミノ酸は、酸化されて α -ケト酸 (RCO_2COOH) となる。これは、補酵素 A (coenzyme A) の媒介によりカルボン酸、つまり脂肪酸となる。基質としてのアミノ酸がアラニンであれば、この脂肪酸は酢酸となり、バリンであればイソ酪酸となり、ロイシンであればイソ吉草酸となる。

後者、すなわち水素受容体として働いたアミノ酸は、還元されてそのまま直接的に脂肪酸に変化する。ここでは、基質としてのアミノ酸がグリシンであれば生成する脂肪酸は酢酸となり、同じくアルギニンであれば4-メチル吉草酸 (4-methylvaleric acid) となり、トリプトファンであればインドリルプロピオン酸 (indolylpropionic acid) となる。4-メチル吉草酸やインドリルプロピオン酸は、さらに分解

平成8年10月1日 受理

明治大学農学部動物生産管理理学研究室 〒214 川崎市多摩区東三田1-1-1

School of Agriculture, Meiji University, Higashimita 1-1-1, Tama-ku, Kawasaki 214

を受けて、悪臭物質である吉草酸やプロピオン酸となる。

悪臭発生機構として、上述のスティックランド反応の他にストレッカー分解 (Strecker degradation)⁴⁾ も古くから知られている。これは、 α -アミノ酸が α -ジケトンと反応して、もとのアミノ酸に比べて炭素が1個少ないアルデヒドとなる分解反応である。下の反応式に示すように、反応の第1段階で α -アミノ酸とジケトンからシッフ塩基が生成され、次いで脱炭酸と加水によりアルデヒド (aldehyde) が生成する。 α -ジケトンとしてアロキサン、ジアセチル、ニンヒドリン等が知られている。アルデヒドも悪臭物質であり、アセトアルデヒド (acetaldehyde) をはじめ6種のアルデヒドが悪臭物質として悪臭防止法の中で指定されている¹⁾。

以上のように、生体腸管内における悪臭の発生は、基本的には蛋白質の分解産物であるアミノ酸に基因しており、その未吸収残存量が多くなればなるほど、悪臭物質生成量も多くなる。

糞尿の悪臭は、畜種によって異なる。ウシ等の反芻家畜では、摂取飼料が腭液による分解を受ける前に、反芻胃内において多くの微生物酵素による分解を受ける。これに対してウマ、ブタ等の単胃家畜では、摂取飼料が腭液等によって分解を受けた後に、盲腸内で微生物酵素による分解を受ける。そして、畜種間では摂取飼料が異なると同時に、これらの微生物の菌叢やそれらによる資化・分解の態様も異なっている。

単鎖脂肪酸は、動物糞の悪臭を特徴づけるものといえることができる。プロピオン (propionic acid)、ノルマル酪酸 (normal-butyric acid)、ノルマル吉草酸 (normal-valeric acid) およびイソ吉草酸 (iso-valeric acid) は、ごく微量の揮散により悪臭として感知される。豚舎悪臭との因果関係も大きいとされている。

プロピオン酸は、酢酸と同様に反芻動物の反芻胃内で微生物の作用で多量に生成され、胃壁から吸収され、生体内でエネルギー源として利用されている (酪酸も同様に反芻胃内で生成されるが、その多量生成は組織細胞内でのケトン体貯留等の害作用を及ぼす)⁵⁾。上記4種の単鎖脂肪酸の腸管内で消長は個別に若干相異なるがブタ腸管内のプロピオン酸の消長は図1に示す通りである⁶⁾。すなわち、ブタの場合プロピオン酸は空腸および回腸内にはほとんど生成あるいは残存していないが、盲腸内で急激に増加し (1,700~2,900mg/l)、以後結腸内で微生物消化作用の続行と腸管壁からの吸収が平行し、直腸内残存量はかなり減量している (1,100~1,800mg/l)。このように、ブタ等単胃動物の糞中単鎖脂肪酸の生成は、盲腸内微生物の分解作用が主因と考えられる。動物糞尿悪臭には、畜種ごとに微妙で明確な違いがあるが、その詳しい解明はまだなされていない。

3 悪臭防止に関する法制上の規制

国内で大気汚染、悪臭、水質汚濁等を規制する法律が制定されたのは、意外というかごく最近のことである。四日市喘息や水俣病を契機として1967年 (昭和42年) に公害対策基本法が制定され、その精神に沿い1972年 (昭和47年) に悪臭防止法が制定された (その後1993年 (平成5年) に公害対策基本法は環境基本法に吸収・統合された)。

悪臭防止法の中で悪臭物質として指定された物質は、当初アンモニア等7種であったが、その後単鎖脂肪酸等5種が追加され、さらに1994年 (平成6年)

図1 ブタ腸管内プロピオン酸残存量

にプロピオンアルデヒド等10種が追加されて、全部で22種となっている¹⁾。

一般に悪臭物質は比較的水に溶け易く、またごく微量で周辺に悪臭を発散するため、物質自体が地域環境あるいは土壌環境に残存して、これらの環境全体を汚染するという危害は、通常生じない。したがって、悪臭防止法の基本的考え方は、悪臭発生源が周辺の関係者や住民に対し一定限度以上の臭気強度で感知されるに至らないことに立脚している。

悪臭防止法に準拠してその概要を述べると、まず「工場その他の事業所における事業活動に伴って発生する悪臭物質の排出を規制することにより、生活環境を保全し、国民の健康の保護に資する」ことを、目的としている。次いで、「都道府県知事は、住民の生活環境保全のために悪臭を防止する必要があると認める地域を、規制地域として指定すべき」こと、さらに「都道府県知事は、規制地域の自然的、社会的条件を考慮して各悪臭物質の規制基準を定めるべき」ことを、うたっている。また規制地域の指定や

悪臭物質規制基準制定に際し、都道府県知事は管轄下市町村長の意見をきくべきことがうたわれ、最後に関係行政機関が不法の円滑な遂行に協力すべきこと、また国も援助し、施設改善、悪臭の健康への影響の研究、悪臭測定方法の研究等を推進すべきことが、言及されている。

防止法施行令では、具体的に悪臭物質22種が指定されている。

同法施行規則では、悪臭物質発生施設敷地と第3者敷地の境界線における特定悪臭物質の濃度に係わる規制基準の範囲を定めており、さらに悪臭物質排出口におけるその流量と濃度の規制基準の設定方法を、数式で示している。また、悪臭物質排出水中におけるその規制基準の設定方法についても、定めている。最後に、悪臭物質の測定方法について、環境庁長官が定めるよう、指示している。臭気判定士の資格の認定についても、定めている。

表1と2に、悪臭防止法で規定されている悪臭物質およびそれらの大気中規制基準と物理特性の一部

表1 悪臭物質とその規制基準①

物 質 名	化 学 式	融点(摂氏度)	沸点(摂氏度)	水溶性	大気中規制基準(ppm)
アンモニア Ammonia	NH ₃	- 77.7	- 33.4	易 溶	1~5
メチルメルカプタン Methyl mercaptan	CH ₃ SH	-121	6.0	微 溶	0.002~0.01
硫化水素 Hydrogen sulfide	H ₂ S	- 82.9	- 60.4	可 溶	0.02~0.2
硫化メチル Methyl sulfide	(CH ₃) ₂ S	- 83.2	37.5	難 溶	0.01~0.2
二硫化メチル Dimethyl disulfide	(CH ₃) ₂ S ₂	(室温で液状)	116~118	不 溶	0.009~0.1
トリメチルアミン Trimethyl amine	(CH ₃) ₃ N	-124	3.0	易 溶	0.005~0.07
プロピオン酸 Propionic acid	CH ₃ CH ₂ COOH	- 22	141	易 溶	0.03~0.2
ノルマル酪酸 Normal-butyric acid	CH ₃ (CH ₂) ₂ COOH	- 5.7	164	易 溶	0.001~0.006
ノルマル吉草酸 Normal-valeric acid	CH ₃ (CH ₂) ₃ COOH	- 34.5	187	可 溶	0.0009~0.004
イソ吉草酸 Iso-valeric acid	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ COOH	- 37.6	177	可 溶	0.001~0.01
アセトアルデヒド Acetaldehyde	CH ₃ CHO	-123	20.8	易 溶	0.05~0.5
プロピオンアルデヒド Propionaldehyde	CH ₃ CH ₂ CHO	(液 体)	49	可 溶	0.05~0.5

表2 悪臭物質とその規制基準②

物 質 名	化 学 式	融点(摂氏度)	沸点(摂氏度)	水溶性	大気中規制基準(ppm)
ノルマルブチルアルデヒド Normal-butyraldehyde	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CHO}$	- 99	74.8	微 溶	0.009~0.08
イソブチルアルデヒド Iso-butyraldehyde	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCHO}$	- 66	63~64	可 溶	0.02~0.2
ノルマルバレールアルデヒド Normal-aleraldehyde	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CHO}$	(液 体)	102~103	微 溶	0.009~0.05
イソバレールアルデヒド Iso-valeraldehyde	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CHO}$	- 51	92~93	難 溶	0.003~0.01
イソブタノール Iso-butanol	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_3$	-108	108	難 溶	0.9~20
酢酸エチル Ethyl acetate	$\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$	- 83.6	77.1	微 溶	3~20
メチルイソブチルケトン Methyl isobutyl ketone	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{COCH}_3$	- 85	117	難 溶	1~6
トルエン Toluene	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	- 95	111	難 溶	10~60
スチレン Styrene	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CHCH}_2$	- 31	146	難 溶	0.4~2
キシレン Xylene	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	$\begin{cases} \text{o-} & - 25.2 \\ \text{m-} & - 47.9 \\ \text{p-} & 13.3 \end{cases}$	$\begin{cases} 144 \\ 139 \\ 138 \end{cases}$	不 溶	1~5

を示す。これらの悪臭物質の中で、動物糞尿悪臭の成分としてしばしば指摘されているものは、アンモニア (ammonia)、メチルメルカプタン (methylmercaptan)、硫化水素 (hydrogen sulfide)、および4種の短鎖脂肪酸 (fatty acids of short chain) である。

アンモニアは、動物糞ばかりでなく、尿からも多く発散するが、他の悪臭物質は主に糞から発散する。アンモニアは、水中では水分子との水素結合によって繋がっており (NH₃・H₂O)、[NH₄⁺+OH⁻] の形でイオンに分離して存在するアンモニアの割合は少ない (pK_a=9.25)。動物糞尿の中に水付加物として混在していたアンモニアは、体外排出後は減圧と曝気により容易に気体として蒸散する。

メチルメルカプタンと硫化水素は、含硫黄アミノ酸に由来する。いずれも室温では気体であり、ごく微量で悪臭の原因となる。

4種の短鎖脂肪酸は、いずれも室温で液体であるが、やはりごく微量で悪臭を発し、大気中規制基準も低数値となっている。最近悪臭物質として追加されたプロピオンアルデヒド以下5種のアルデヒド、ならびにイソブタノール、酢酸エチル、メチルイソブチルケトン、トルエンおよびキシレンは、必ずし

も嫌悪すべき悪臭を発するものではないが、他の悪臭物質と協同するとき、悪臭強化の相乗作用をもたらすと考えられる。

4 悪臭物質の測定方法

悪臭は、悪臭物質のごく微量の大気中混入により嗅覚に感じるため、この微量を測定するのはかなり面倒である。悪臭の測定には、ヒトの嗅覚による方法と化学定量による方法がある。

1) ヒト嗅覚による臭気の判定

悪臭判定に際し、悪臭物質が何であるかを嗅覚で判別するのは容易ではないが、臭気の有無やその強さの測定では、化学定量より嗅覚による方が鋭敏であるといえる。ただし、嗅覚にはかなりの個人差がある。一般に女性は男性よりも鋭敏であり、年齢的には特に妙齢の女性が最も鋭敏と云われる。逆に、高齢の男性は最も鈍感ということになる。このため、臭気検査や食味検査のパネリストとしては、若い女性の方が適している。これらの検査では、通常約5名のパネリストが検査を行う。

嗅覚による臭気検査において、臭気はその「快・不快度」と「臭気強度」に分けて判定される。表3

に示すように、快・不快度は「極端に快」から「極端に不快」まで9段階に分かれる。動物悪臭は一般に不快であろうから、通常このように区分する必要はない。臭気強度は表4のように区分されるが、「臭気濃度」に従属させて次のように示すこともできる。

$$I = k \log C + a$$

ここでI：臭気強度，C：臭気濃度，k，a：定数
この式は、「感覚の強さが刺激の対数に比例する」というウェーバー・フェヒナーの法則（Weber-Fechner's law）に準拠している。

臭気濃度Cは、次のように定められている。

C＝検知閾値に至る希釈倍数

この濃度測定のための気体の希釈は、臭袋を用いた3点比較法（3試料のうち1試料だけにおいの濃度を変え、これを識別させる）による。

臭気強度を示す上記の式において、定数kとaは、たとえばプロピオン酸ではk=1.38，a=4.60である。

既述のように、嗅覚には個人差があること、またさらに特定の臭気を一度感知すると、その後暫くの間同一臭気に対する「慣れ」が生じて、それを感知（あるいは検知）し難くなるなどの臭気判定上の隘

路がある。

2）化学定量による臭気の判定

悪臭防止法では、悪臭物質の規制基準を化学定量値で示しており、悪臭物質の測定方法を定めるよう環境庁長官に命じている。ここでは、動物糞尿悪臭に特に深く関与していると思われるアンモニア、メチルメルカプタン、硫化水素、および4種の短鎖脂肪酸について、その測定方法を環境庁告示（平成元年改正）から抜粋して示す⁷⁾。

〔アンモニアの測定方法〕

①試料の捕集

吸引ポンプ（10l／分以上の吸引能力）で約20mlの捕集液（0.5%ホウ酸溶液2本連結）に5分間大気を吸引して、捕集する。

②試料溶液の吸光度の測定

試料溶液10mlにフェノール・ペンタシアノニトロシル鉄(III)酸ナトリウム溶液5mlを加え、混和後次亜塩素酸ナトリウム溶液5mlを加え、混和する。25～30℃で1時間放置後、波長640nm付近で吸光度を測定する。同様に、捕集溶液について測定し、盲検値とする。

別にアンモニア標準液を調製し、検量線を作成する。

〔メチルメルカプタンおよび硫化水素の測定〕

①試料ガスの捕集

試料採取袋（ポリふっ化ビニルフィルム製等）を吸引ケースに入れ、ふっ素樹脂製コックに接続し、吸引ケースを減圧することにより試料ガスを吸引・採取する（1l／分，5分間）。

②試料の濃縮

液体酸素等で冷却した試料濃縮管の中に、試料採取袋中のガスを吸引し、被検成分を捕集する。試料濃縮管は、ほう硅酸ガラス製またはふっ素樹脂製で（内径3～4mm）、内部をよく洗滌後被検成分分析用ガスクロマトグラフ充填剤と同種（または同等以上の性能）のものを充填したもので、温度制御用熱電対とニクロム線を巻き付けたものとする。

③ガスクロマトグラフによる分析

被検成分を捕集した試料濃縮管をガスクロマトグラフ分析装置（水素炎イオン化検出器（FID）を併設した炎光光度検出器（FPD）を備えたもの）に接続し、濃縮管を約2分間で70℃程度にまで昇温させて、被検成分をガスクロマトグラフに導入する。カラム充填剤は、粒度60～80メッシュの白色硅藻土担体（ジ

表3 臭気の快・不快度

指数	内 容
+4	極端に快
+3	非常に快
+2	快
+1	やや快
0	快でも不快でもない
-1	やや不快
-2	不快
-3	非常に不快
-4	極端に不快

表4 臭気強度

指数	内 容
0	無 臭
1	やっと感知できるにおい（検知閾値）
2	何のにおいであるかわかる弱いにおい（認知閾値）
3	楽に感知できるにおい
4	強いにおい
5	強烈なにおい

メチルジクロロシラン処理)に β , β' -オキシジプロピオニトリルを25%被覆したもの(またはこれと同等以上の性能をもつもの)とする。

別に、メチルメルカプタンおよび硫化水素校正用ガスを調製し、これらをガスクロマトグラフに導入して検量線を作成する。

硫化メチルおよび二硫化メチルも同様の方法で測定することができる。

〔プロピオン酸、ノルマル酪酸、ノルマル吉草酸およびイソ吉草酸の測定〕

①試料の採取

試料捕集管(ほう硅酸ガラス製、内径7～8 mm、長さ約10cm)のシリコンゴム栓およびふっ素樹脂製キャップを外し、ポンプで吸引して試料を採取する(5 l/分、5分間)。

②ガスクロマトグラフによる分析

被検成分を捕集した試料捕集管に注射針を付け、180℃に加熱して窒素ガスを流した後(100ml)、これをガスクロマトグラフ分析装置(水素炎イオン化検出器を備えたもの)に接続し、試料捕集管にぎ酸を注入し(20 μ l)、次いでこれを室温から180℃まで約1分間で昇温させて、被検成分をガスクロマトグラフに導入する。カラム充填剤は、粒度15～30メッシュのガラスビーズを洗滌、乾燥後これに水酸化ストロンチウムを1%被覆したものとする。

別に、プロピオン酸、ノルマル酪酸、ノルマル吉草酸およびイソ吉草酸の標準溶液を調製し、これらの微量(1～2 μ l)をガスクロマトグラフに導入して、検量線を作成する。

(なお、上述のガスクロマトグラフに使用する充填剤入り専用カラムは、市販されている。)

3) ガス検知管による臭気簡易測定

前項に示した臭気の化学定量による方法、特にガスクロマトグラフを用いる方法は、高額の測定装置を必要とし、その操作も比較的煩雑であり、検体の正確な測定を行うには相応の熟練を要する。測定結果を学術報告等として出す場合には、この化学定量に拠ることが要求されるが、臭気発生の概況を知ることだけが目的である場合には、市販のガス検知管に拠る方がはるかに安価でかつ簡便である。ただしこの場合、測定結果の信頼性は化学定量による場合より若干劣ると思われる。しかし、検知管による測定法はJISで規格化されており、必ずしも信頼性が低いとはいえない。

ガス検知管(検知管式ガス測定器)は、きわめて多種類の気体状(室温)物質に対して準備されている。本法では、ガス採取器が準備されており、これに検体ガスの一部を吸引し、そのうちガス物質濃度に応じて100～800mlを測定対象気体ごとに準備されている検知管に注入する。そして検知管内に充填されている化学物質の変色度合等により当該ガス物質濃度を判定する。検知管は使用の都度消耗される。

本稿では、悪臭物質を対象として説明しているが、市販の検知管は臭気の有無に関係なくきわめて広範囲の気体状化学物質を対象として準備されており、悪臭物質はそれらのごく一部である。このため、筆者の手元にある検知管カタログの中には、表1、2に示す22種の悪臭物質のうち二硫化メチル、吉草酸、ブチルアルデヒド、バレルアルデヒド、およびメチルイソブチルケトンに対しては、検知管が準備されていない。

5 家畜家禽生産に利用可能な悪臭防止技術

昨今、家畜家禽生産現場における悪臭の発生とその防止に対する関心が高まり、悪臭防止のための消臭剤(主に微生物製剤)も数多く発売されている。旧来の家畜家禽生産における技術改善が家畜個体(あるいは系統)の遺伝資質向上、飼料利用効率の向上、疾病の予防、生産物の品質向上等、いわば生産の『量的』改善が目標となってきたのに対し、今後の家畜家禽生産では生産の『質的』改善、すなわち生産過程全体を生産従事者の生活の中に如何に位置づけるか、そして如何に環境に調和して生産を継続するかが、重要な課題となってきた。

動物生産における悪臭の発生は、糞尿の処理と切り離して考えることはできない。一般に市販されている消臭剤は、それ自体悪臭の資化・分解効果のあるものと考えられるが、これを広い面積に頻繁に使用する必要があるというのでは、非実用的である。したがって、家畜家禽生産における悪臭防止技術確立のためには、畜舎全体の設計も含めてシステム工学面から配慮することが、要求される。

1) 悪臭防止のための家畜家禽生産システム

悪臭防止のための家畜家禽生産システムは、基本的に畜舎や糞尿処理施設を閉鎖式に建築することにより達成される。これによって、ハエなど害虫の発生も大幅に低減できるであろう。この場合、夏季の暑気対策が問題となるが、これは建物設計(屋根を

高くする等)や換気方法の工夫により、対処することとなる。また、側壁の多くの部分に透光材を使用する。

閉鎖式畜舎は、すでに SPF 豚生産、ブロイラー肥育、産卵鶏飼育、豚肥育、繁殖豚飼育等にとり入れられており、目新しいことではないが、悪臭防止技術確立のためには、これらの畜舎から排出される糞尿の処理施設をも閉鎖式とすることが必要である。そして、これらの閉鎖式建物・施設から排出される排気を脱臭設備に導入する(脱臭設備については次項に説明する)。SPF 豚生産では当然閉鎖式の建物となるが、SPF 豚生産は「清浄豚の生産」による生産効率向上を目的としており、基本的に生産方式も異なり、投資額も大きくなる。この場合悪臭発生が少なくなることは当然といえよう。

閉鎖式畜舎の建設は、生産の集約化および省力化と併行して今後全畜種について益々推進されるべき課題である。いわゆる点灯養鶏では、明暗時間調節のために無窓とし、太陽光も遮断されるが、本稿で述べる閉鎖式畜舎は大気の入出りを人為的に調節するのが目的であるから、窓はガラス等とし、採光を考慮する。無採光よりも採光の方が節電可能であり、作業従事者への精神的圧迫感も少ないであろう。

糞尿処理施設は、畜舎に隣接させるのが望ましい。糞(あるいは新鮮厩肥)の発酵・乾燥処理施設の場合、処理中にかなり高濃度の悪臭が発生するため、攪拌処理等は無人化とするのがよい。これによって省力化にもなる(すでにかなり普及している)。

堆肥センターなる名称からも推察できるように、昨今では家畜家禽の糞・新鮮厩肥の発酵・乾燥処理は全国に普及しており、一処理施設当たりの処理量も多量になっている。これに応じて、施設も大規模になってきている。このため、これらの大規模処理施設を閉鎖式とすることは、投資上も負担が大きくなり、また処理作業の遂行上あるいは糞の搬出入の作業上新たな困難も生ずると思われるが、悪臭発散防止の効果をあげるために、原則「閉鎖式」を貫くことが重要であろう。

尿・汚水処理については、現実には廉価で効率の良い処理方法がまだ確立されていない事情もあり、糞・新鮮厩肥の発酵・乾燥処理施設に比べれば、その処理技術と施設はまだあまり普及していないといえよう。尿・汚水処理施設は、一般に戸別処理となるため規模もあまり大きくはなく、したがって、閉鎖式とする施工にはそれほど困難は生じないであ

う。

上述のような閉鎖式とした畜舎および糞尿処理施設には、適所に適度の能力の換気扇を設置することが必要となる。本稿は、これらの設計について詳述することは目的としていないが、畜舎内および処理施設内の空気の流路および流量の調節は、それだけで生産上きわめて重要な課題であり、慎重な検討を要する。

2) 脱臭方法

脱臭方法として、一般に水洗法、燃焼法、吸着法(活性炭、燐炭、ゼオライト、おが屑等への吸着)、薬液処理法(希硫酸液、希水酸化ナトリウム液、希木酢液等の噴霧)、マスキング法(芳香成分の揮散により悪臭を隠蔽する)のような化学的方法と、菌混入法(微生物製剤の噴霧や混入)、接触・分解法(脱臭塔等の利用による吸着・微生物消化)、土壌法(土壌層への悪臭の誘導・分解)等のような生物学的方法がある。

産業動物生産における悪臭物質除去の方法としては、脱臭の効果や消耗資材費用の面から、後者の生物学的方法が実用的である。この生物学的方法では、土壌微生物が重要な役割を演じている。

3) 微生物による悪臭物質の資化・分解

前々項で述べたように、畜舎や糞尿処理施設を閉鎖式とすれば、これらの建物・施設からの排出ガスが脱臭施設(あるいは設備)に誘導されることとなる。このような悪臭集中分解処理により、微生物による悪臭物質の資化・分解の効率を高めることができる。以下、主要な処理方法について概要を述べる。

〔菌混入法〕

本法は、微生物製剤を畜舎の尿溝、堆肥集積場、糞発酵・乾燥施設内、汚水曝気槽等に直接散布する方法である。畜産現場用微生物製剤としてすでに数多くの製品が市販されている。各製品に含まれる微生物が具体的に何であるかは一般に明示されておらず、通常使用法のみが示されている。

したがって、微生物製剤利用による菌混入法の作用については、各製剤の含む微生物種によって異なるが、概ね次のように考えられる。すなわち、微生物製剤に含まれる菌種は好気性あるいは微好気性のものであり、放線菌、枯草菌、硝化菌、硫黄細菌、シアノバクテリア *Cyanobacteria*、野生酵母、子囊菌、接合菌等と考えられる。

放線菌、子囊菌、接合菌等は土壤中に多く生息しており、これらの微生物から分泌されるアミラーゼ、プロテアーゼ、セルラーゼ、リグニン分解酵素等により、高分子物質が分解される。

枯草菌 *Bacillus subtilis* も土壌、枯草等自然界に広く分布し、細胞外にアミラーゼやプロテアーゼを分泌する。本菌を豊富に混入させることにより、有機物の分解が促進される⁹⁾。

硝化菌である *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* 等は、アンモニアを亜硝酸に、亜硝酸を硝酸に酸化する⁹⁾。これによってアンモニアの悪臭は消失し、かつ植物に利用され易くなる。硝化作用は一部の放線菌によっても行われる。

硫黄細菌である *Thiobacillus*, *Thiospira* 等は、硫化水素や単体硫黄を硫酸塩に酸化する⁹⁾。これによって硫化水素の悪臭は除去される。硫黄酸化作用は、滑走細菌である *Beggiatoa* や *Thiothrix* も有している¹⁰⁾。

シアノバクテリアは土壌表面、岩石上面、陸水域等に生息する藻類の1種で、 O_2 発生型の光合成を行うが、同時に窒素固定を行うものが多い。

酵母は一般に発酵食品の製造に広く利用されているが、野生酵母と称されるものが土壌、海水、樹液、空中等に分布している。酵母は主として単糖や2糖を分解してエタノールと炭素ガスを生成する。脱臭用製剤に本微生物はそれ程含有されないとと思われるが、無視することはできない。

以上のように、ここでは市販製剤製品に含まれると思われる微生物を推定し、それらの作用の概要を述べた。

〔接触・分解法〕

本法は、悪臭含有ガスを塔型等の設備に誘導し、これらの設備に充填した脱臭剤に吸着・接触させ、分解する。吸着・脱臭剤として土壌、粃殻、ゼオライト、燐炭等の混合物が用いられる。この脱臭剤はガス吸着性の良好のものが良い。脱臭塔の設置概要は、図2の通りである。脱臭塔は畜舎や発酵・乾燥舎の北側に設置するのが望ましい。脱臭塔には天蓋も底板も付けない。これは自然の降雨により悪臭物質の分解産物 (NO_3^- , SO_4^{2-} 等) を地中に流亡させるためである。晴天続きで塔内が乾燥し、臭気の吸着・分解が不良となるときは、上面から水をシャワーで注ぐのが適当である。塔側面囲い板 (通常鉄板製の) の腐蝕や塔足下地中の変質のために、約10年程度の使用後脱臭塔の位置を若干移動することについて

でも、配慮すべきである。

本法では、悪臭物質は塔内の脱臭剤に接触・吸着し、次いで土壌微生物により分解される。微生物の種類と数は土壌により異なるため、使用する土壌に注意を払うべきである。悪臭物質の資化・分解に働く土壌微生物は好気性または微好気性であるが、これらの生育・繁殖には適度の水分 (60%前後)、適度の温度 (20~30℃)、適度の酸素 (通気性保持)、ならびに適度の pH (中性~弱酸性) を必要とする。これらの微生物のエサ (栄養源) は、もちろん悪臭物質である。主たる悪臭物質の分解過程と作用する微生物は、前節の説明と同様であるが、概ね次のように表わすことができる。

接触・分解法においては、脱臭塔からの排出気体が無臭であることが第一に要求されるが、同時に塔内微生物の活力維持も要求される。この微生物活力維持が成立してこそ、初めて本法の特性を生かすことができる。そのためには、畜舎等から排出される排気量と臭気濃度に応じて、脱臭塔の容量を決めることとなる。

土壌の硝化能力を評価基準としたときの試算例を示す。例えば土壌の硝化能力を土壌 (乾物) 100g 当たり窒素で10mg/日 (湿土壌200g 当たり10mg/日)

図2 脱臭塔による悪臭物質の接触分解法

とする。いま或る豚糞強制発酵・乾燥施設から1000 ppmのアンモニアを含む排気が毎分1 m³排出されたとすると、1日(20時間運転)当たりアンモニア(窒素換算)排出量は、

$$\frac{1000}{10^6} \times 1 \times 60 \times 20 \times \frac{1}{22.4} \times 14 = 0.75 \text{ kg}$$

したがって、これを硝化するに必要とされる土壌量は、

$$\frac{0.75}{\frac{10}{10^6}} \times 100 = 7.5 \times 10^6 \text{ g} = 7.5 \text{ t} \approx 5.0 \text{ m}^3 \quad (\text{乾土壌})$$

乾土壌7.5t(乾重量)には、空気の間隙が約40%含まれると仮定すると、約4.5m³となる。実際には運転上の安全性を考慮して、計算値の1.5~2.0倍程度の容量で計画するのがよいであろう。なお、脱臭塔使用の場合には、土壌と他の吸着剤を混合するため、全脱臭資材中の土壌の割合が小さくなる(例えば30%)。しかし、土壌以外の吸着剤の中に土壌細菌が同等に増殖すると想定し、全脱臭資材合計量を土壌量とみなしてよいであろう。

【土壌法】

本法の原理は、基本的には前節に述べた接触・分解法と同様である。ここでは発生臭気を地表近くの地中に誘導して、これを土壌微生物の作用で資化・分解することを意味する。

第3、4図に示すように、本法による脱臭施設は、悪臭発生施設の排気ファンからの臭気ガスを、すぐに地中埋設の送気管に誘導し受け入れるものである。この場合、送気管を分岐してもよく、継ぎ目のガス漏れの有無はあまり苦慮する必要がない。この送気管には排気ファンからの遠近に応じて側面に排気孔を設ける。送気管の周囲は通気性良好とするために、図4のように砂利や軽石を配置するのが良い。

この土壌法における臭気ガス送気管1 mあたりに付随する脱臭用土壌体積は概ね0.5m³(0.5m×1.0m×1.0m)とみなすことができるであろう。したがって、土壌の硝化能力を評価基準とすれば、臭気ガスの脱臭処理に要する土壌体積は前節における計算式と同様に計算することができる。前掲の事例のように、脱臭用土壌量として5.0m³が算出されたとすれば、送気管として約10m(5.0/0.5=10)を準備すればよい。本法では、降雨を受ける面積が広く、同時に化学成分の流亡する面積も広いため、かなり長期間にわたる使用が可能と考えられる。しかし、長期乾燥や臭気物質過多等による土壌中微生物の活

図3 脱臭用土壌層への悪臭ガスの誘導

図4 脱臭用土壌層内ガス誘導管の構造(横断面)

力の低下の発生も考慮して、送気管を根元で分岐し、常時使用は全送気管の半分とするような設計を行うのが、望ましい。

以上、微生物による悪臭物質の資化・分解の方法について、概説した。家畜・家禽飼育においては、衆知のように輸入畜産物との競争の中で益々の生産費節減が要求されている。このような厳しい経営環境の中で、脱臭施設を新たに設置することは生産者にとってきわめて大きな負担であり、このため脱臭施設の設置は簡便で、廉価で、日常管理も不要の方法が要求される。

6 おわりに

国内の家畜家禽生産は、近年益々集約化され、このため大きな歪みが生じてきた。すなわち生産に伴う環境汚染の問題である。このため、家畜家禽生産技術は、旧来の課題にのみならず、『環境との調和の中で生産する』という新たな課題の下に、新技術が追求されなければならない。

本稿に概説したように、畜舎や糞尿処理施設からの発生悪臭の問題は、防止できる課題であり、将来の国内での生産にあっては、必ず防止しなければならない。もちろんそのために過大な投資となるのでは、真の生産技術とはいえない。廉価でかつ有効な技術の開発は、生産者や技術者の自覚と努力によって必ずや達成されるであろう。

参考文献

- 1) 日本獣医師会編集 (1996), 獣医畜産六法 平成8年版 1793-1804, 新日本法規出版, 東京.
- 2) 中央畜産会 (1990), 畜産における臭気とその防止対策, p.13-16, 中央畜産会, 東京.
- 3) 本多勝男, 米持勝利 (1992), 飼養環境の整備と畜舎臭気の発生状況, 畜産の研究 46: 1101-1104.
- 4) 大木道則, 他 (編) (1989), 化学大辞典, 1207, 東京化学同人, 東京.
- 5) 其田三夫 (監) (1987), 牛の臨床 226-231, デーリイマン社, 札幌.
- 6) Asian-Australasian J. Ani. Sci.に投稿中.
- 7) 環境庁環境法令研究会 (編) (1996), 環境六法 平成8年版 250-283, 中央法規出版, 東京.
- 8) Sneath, P.H.A. (ed.) (1986), Bergey's Manual of Systematic Bacteriology Vol.2, 1130, Williams & Wilkins, Baltimore.
- 9) Staley, J.T. (ed.) (1989), Bergey's Manual of systematic Bacteriology Vol.3, 1813-1814, 1842-1852, Williams & Wilkins, Baltimore.
- 10) Willams, T.M. and R.F. Unz (1985), Filamentous sulfur bacteria of activated sludge: Characterization of Thiothrix, Beggiatoa and Eikelboom Type 021N strain, Appl. Environ. Microbiol. 49: 887-898.