

堆肥化施設に係る臭気の発生抑制に関する調査(第 2 報)

化学部

神野 憲一 小西 智之 平野 真弘
金田 治彦¹ 小池 静司

(¹ 現大気環境部)

1 はじめに

廃棄物処理施設の堆肥化施設では、稼働後、悪臭防止対策が設計どおりに十分な効果を発揮しきれず、悪臭苦情を引き起こしてしまう事例がある。このような場合、事業者はさらなる設備投資等により対策を講じることとなるが、施設設置後の設備追加は、改善までに時間がかかるだけでなく、コスト面における事業者の負担も大きい。このため、堆肥化施設の悪臭防止対策設備は、堆肥化施設から発生する悪臭物質の種類及び量をあらかじめ明確にした上で、設計することが重要である。

本調査は、堆肥化施設における臭気物質の発生要因等について調査し、堆肥化施設に対する審査・指導の参考となる行政資料を作成することを目的とする。

27 年度は文献などの書類調査を行い、堆肥化のしくみや設備に係る情報を収集するとともに、実地調査の測定項目選定のための概況調査を実施した¹⁾。28 年度は、臭気中の脂肪酸定量法の開発を行うとともに、産業廃棄物処分業許可を有する堆肥化施設 10 施設への実地調査を行ったので報告する。

2 臭気中の脂肪酸定量法の開発

既報¹⁾で報告したとおり、臭気の定性分析では、固相マイクロ抽出(Solid Phase Microextraction: SPME)法を用い、臭い嗅ぎ装置(ODP)付き GC/MS により SCAN 測定した。この結果、ODP で臭いを感じたピークについて検索したところ、脂肪酸が確認された。そこで、堆積物試料から発生する臭気中の脂肪酸濃度定量法を検討した。

3 調査方法

3.1 臭気中の脂肪酸定量法

SPME(SIGMA-ALDRICH 製 SUPELCO ポリエチレングリコールファイバー(膜厚 60 μ m))と、モノリス構造のシリカ吸着剤(ジーエルサイエンス製 MonoTrap DCC18)を用いて、脂肪酸の定量法を検討した。その結果、シリカ吸着剤を採用することとし(4.1 に詳述)、実地調査で採取した堆積物試料を、以下のとおり分析した。

堆積物試料 2g を 40mL バイアル瓶に入れ、60 $^{\circ}$ C で加温し、ヘッドスペース中に拡散させた臭気を、MonoTrap DCC18 に 1 時間吸着させた。MonoTrap DCC18 をバイアル

瓶から取り出し、10mL 遠心沈殿管に入れ、アセトン 1mL を加え、10 分間超音波抽出した。このアセトン溶液に、内部標準物質(2-エチル酪酸) 2 μ g を添加後、GC/MS で測定した。

3.2 実地調査

施設内を調査するとともに、施設管理者へのヒアリングにより、施設構造や堆肥化条件等を確認した。現場での悪臭物質濃度等の測定、堆肥化過程における堆積物採取と水分等の測定、臭気中の脂肪酸定量を行った。

3.2.1 調査年月日及び調査対象施設の概要

調査年月日及び調査対象施設の概要を表 1 に示す。いずれも好氣的分解を処理に利用しており、内訳は通気性堆肥舎(床に送風設備あり) 5 施設、堆肥舎 1 施設、スクープ式(床に送風設備あり) 4 施設である。全施設で、動植物性残さを受け入れている。

3.2.2 調査項目

調査項目と分析方法を表 2 に示す。堆肥化施設設計マニュアル²⁾によれば、堆肥化は好気性微生物の活動を活発にすることが重要であり、良好な堆肥化には、水分、栄養(有機物)、空気、微生物、温度、時間が大きな要因であることから、これらの項目を選定した。また、堆肥化における発酵及び臭気発生の状況を確認するため、原料保管施設、原料混合直後、堆肥化過程の堆積物について、現地測定及び試料採取を行った。

4 結果及び考察

4.1 臭気中の脂肪酸定量法

堆積物試料から発生する臭気中の脂肪酸定量における GC/MS の測定モードは、選択性と感度が高い SIM とした(表 3)。前処理方法として、SPME は、妨害ピークの低減が難しかったが、MonoTrap DCC18 は、妨害ピークのないクロマトグラムが得られた。バイアル瓶に標準物質を添加し、3.1 の方法により前処理を行い、得られたクロマトグラムを図 1 に示す。また、実試料のクロマトグラムを図 2 に示す。

なお、本法により定量した脂肪酸濃度は、堆積物試料が入ったバイアル瓶のヘッドスペースを採取した臭気濃度であり、現場で採取した臭気濃度ではないことに注意が必要である。

4.2 実地調査結果

4.2.1 原料(廃棄物)の受入及び保管

原料(廃棄物)の保管状況と臭気発生状況を表4に示す。受入物を発酵槽に投入するまでの保管期間は、0日(受入当日に混合)が6施設、1~2日が2施設、最長1週間が2施設であった。動植物性残さは腐敗しやすいため、保管期間を短くしている事業者が多かった。

保管期間が最も長かった施設は、最長1週間の施設AとBであった。施設Aは動植物性残さを戻し堆肥と混合して保管しており、腐敗臭はしなかった。戻し堆肥との混合により好氣的分解が進み、悪臭の発生が抑制されると考えられる。一方、施設Bは特に処理を行わず保管しており、保管場所の床に水がたまり、腐敗臭を感じた。

受入時の条件について、施設BとJは、特に条件を設けず、細断されていない野菜が散見された。それ以外の施設は、条件を設定しているか、受入前に廃棄物の性状を確認していた。

4.2.2 原料混合時(堆肥化開始時)の状態

コンポスト化マニュアルによれば、良質の製品を生産するためには、二つの重要な条件がある³⁾。

- ・原料条件：原料の水分や比重等を、好氣的分解を促進する条件に合わせる。
- ・操作条件：堆肥化期間中、切り返しや通気などの操作により好氣状態を保つ。

この二つの条件により、混合物の好氣的分解が進み、有機物の分解により原料の温度が上昇し、高温が維持されることで、病原菌や寄生虫卵を死滅させ、安全で衛生的な製品を生産できる。

原料の混合にあたっては、受入原料の性状により、異物を除去し、副資材や戻し堆肥と混合し、水分や比重を調整する。副資材と戻し堆肥は、水分調整と通気性向上のため使用されている。また、戻し堆肥は堆肥化に必要な菌も含んでいる。

各施設の原料混合時の状態を表5に示す。副資材と戻し堆肥両方を使用している施設が6施設、副資材のみ使用している施設が1施設、戻し堆肥のみ使用している施設が3施設であった。

原料条件で特に重要な指標である水分や比重等は、以下のとおりであった。

① 水分

原料の水分が高いと原料の粒子間が水で満たされ、通気性が悪くなり、嫌気状態になりやすいため、堆肥化開始時は、水分を55~70%位に調整する必要がある²⁾。水分が55~70%の施設は4施設(施設A、E、F、G)、70%以上の施設は3施設(施設B、H、J)、55%未満の施設は3施設(施設C、D、I)であった。

② 比重

比重(容積重)は通気性の指標であり、比重が小さい程空隙率が高く、通気性が良い。水分が同じでも比重が小さい方が通気性は良く、堆肥化過程の温度上昇が速い。

比重を0.5にできるだけ近づけると通気性が良くなる²⁾が、比重0.6以上の施設が3施設(施設D、G、H)あった。

③ C/N比

原料の中には、分解しやすい有機物が多量に含まれており、微生物の栄養源となる。栄養バランスの指標として、C/N比(炭素と窒素の比率)が用いられている。微生物のC/N比は約20であることから、C/N比の高い有機物は微生物によって分解され、次第にC/N比が20に近づいていく。C/N比が20より低い混合物は、窒素の割合が高いため、堆肥化過程で有機物の分解に伴い、余剰な窒素がアンモニアとして放出される。原料混合時のC/N比が高いと分解が遅くなる傾向があるため、C/N比は40以下、できるだけ30以下とすることが好ましい³⁾とされているが、C/N比が30を超えた施設はなかった。

④ pH

原料のpHが4~6程度の酸性であっても、特に調整する必要はない³⁾。混合物の水分や比重等を最適な条件に調整し、通気を行い好氣的分解が進むと、アンモニアが発生し、pHは7~9に上昇する。pHが最も低かった施設は、pH4.1の施設Bであり、その原料の水分が高いことから、嫌気状態により発生した脂肪酸の影響で酸性になったと推察され、堆肥化過程においても低い状態であった。全体では、pH7前後の施設が多かった。

⑤ 温度

原料の温度が低いと堆肥化の立ち上がりに日数がかかる。一般に、温度が10℃を下回ると微生物の活動が急速に低下するため、それ以上に保つことが好ましい³⁾。冬季に調査した施設HとIは、他の施設より温度が低く、20℃以下であった。

⑥ 粒径

原料の粒径を小さくすることは、原料と空気が十分に接触することになるため、好氣的分解を促進する上で重要である。団子状、塊状の原料は1cm以下にしないと内部が分解されない³⁾。施設BとJでは、細断されていない野菜が散見された。

4.2.3 堆肥化の状況と臭気発生状況

今回調査した10施設は、いずれも好氣的分解を処理に利用した施設であり、処理の主役は好氣性微生物である。各施設の堆肥化の状況と臭気発生状況を図3に示す。

好氣的分解が進むと、主にアンモニアが発生する。この場合、好氣性微生物の活発な代謝のため発熱し、堆積物は高温(50~70℃)となる⁴⁾。一方、嫌氣的分解が進むと、主に低級脂肪酸やメチルメルカプタン、硫化水素が発生し、堆積物の温度は好氣的分解のように高温にならない。これらの物質は、嗅覚閾値が低い、つまり低濃度でも不快に感じる物質であり⁵⁾、悪臭規制法の規制項目とされている物質もある。嫌氣的分解は、好氣的分解よ

り分解速度が遅く、堆肥化の時間が長くなる。

実際の堆肥化では、完全な好気状態を維持することは難しく、堆積物内部には嫌氣的部分が存在する。この嫌氣的部分は、通気や切返しを適切に行い、堆肥化を促進させれば、最小限にすることができ、脂肪酸等は比較的速やかに分解される²⁾。

好氣的分解の例として、施設Aが挙げられる。温度(内部)は混合直後約80℃に達し、その後緩やかに低下した。水分率も混合直後の約60%から徐々に低下し、4週目に約30%になった。pHは、混合直後から4週目まで約8で推移したが、これは好氣的分解により発生したアンモニアによる影響と考えられた。においセンサーによる複合臭強度は分解が進むにしたがい減少し、アンモニアも同様に減少した。硫化水素、メチルメルカプタン、脂肪酸はいずれの過程でも検出されなかった。

一方、嫌氣的分解の影響が見られる例として、施設Bが挙げられる。温度(内部)は、混合直後約30℃から2週目に約50℃に達した後、約50～60℃で推移し、11週目に約70℃に達した。水分率は混合直後の約70%から少しずつ低下し、11週目に約60%になった。pHは、混合直後から11週目まで約4で推移したが、これは嫌氣的分解により発生した脂肪酸による影響と考えられた。複合臭強度は混合直後と2週目で2,000超、4週目以降は約1,200～1,300で推移した。脂肪酸は、2週目に最高2,200ppmに達した後、徐々に低下した。アンモニア、硫化水素、メチルメルカプタンは不検出であった。施設Bの複合臭強度は、施設Aより高く、脂肪酸の影響が大きいと考えられた。

施設D、E、F、G、Iは、温度50～70℃、アンモニアの最高濃度80～330ppm、pH7～8、脂肪酸やメチルメルカプタンは低濃度であり、施設Aと同様、好氣的分解の特徴を示した。

施設Jは、温度50～70℃、アンモニアの最高濃度130ppm、pH7～9を示し、好氣的分解の特徴を示した。一方、脂肪酸濃度は最高1,300ppmと施設Bに次いで高かったことから、嫌氣的分解の影響があると考えられた。

施設Cは、温度50～60℃であったが、アンモニアは不検出で、pHは約5であった。施設Cは好氣的分解が進んでいるが、アンモニアの発生が少ないため、混合時からpHがほとんど変化しなかったと考えられた。

施設Hは、温度が約15℃から徐々に上昇、最後の熟成段階でようやく50℃に達し、アンモニアの最高濃度は8ppmであった。冬季の低い外気温の影響により混合時の温度が低かったことと、水分が高かったことにより、好氣的分解の立ち上がりに時間を要したと考えられた。

4.3 堆肥化に影響する因子

前述のとおり、堆肥化に影響する原料条件と操作条件について、どの因子による影響が大きいのか検討した。

各施設の操作条件を表6に示す。10施設の内、嫌氣的分解により発生する脂肪酸が最も高かった施設B、次に高かった施設Jに着目した。

① 原料条件

施設Bの水分は70.7%と、適切とされる55～70%の範囲外であった。また、施設Bは、原料保管時の状況から、すでに脂肪酸が発生していたと考えられる。また、混合物に細断されていない野菜が散見された。

施設Jは、水分71.3%と、適切とされる55～70%の範囲外であった。また、混合物に細断されていない野菜が散見された。

② 操作条件

施設Bは発酵槽の床に水がたまり、送風機による空気が堆積物に十分行き渡らない様子であった。また、施設Jは、堆積高が3～5mもあることから、バックホーによる切返しが難しい場所に、嫌氣的部分が存在すると考えられた。

以上、施設Bと施設Jは、混合物の水分が高いこと、原料がよく細断されていないこと、送風機や切返しによる通気が行き渡りにくいことから、嫌氣的部分が解消されにくいため、脂肪酸等が発生し、その分解も遅いものと考えられた。

5 まとめ

- ・ シリカ吸着剤MonoTrap DCC18を用いることにより、臭気中の脂肪酸を定量することができた。
- ・ 好氣的分解が進むと、主にアンモニアが発生し、堆積物が高温(50～70℃)となった。
- ・ 嫌氣的分解により発生する脂肪酸が高濃度検出された施設があり、これらの施設は複合臭強度も高かった。混合物の水分が高いこと、原料がよく細断されていないこと、送風機や切返しによる通気が行き渡りにくいことから、嫌氣的部分が解消されにくいため、脂肪酸等が発生し、その分解が進みにくいと考えられた。
- ・ 堆肥化に影響する因子として、混合物の水分や原料の粒径などが考えられたが、今後さらにデータを積み重ね、臭気発生を抑制する条件を検討することとしたい。

6 謝辞

本調査に際して、御助言いただきました栃木県畜産酪農研究センター、分析機器使用を快諾いただいた栃木県農業環境指導センターに深謝いたします。また、書類調査及び実地調査に協力いただいた各事業者の皆様、廃棄物対策課、各環境森林事務所等に深謝いたします。

7 参考文献

- 1) 高松香織他, 堆肥化施設に係る臭気抑制に関する調査(第1報), 栃木県保健環境センター年報, 21, 72-76, 2016.
- 2) 堆肥化施設設計マニュアル, 社団法人中央畜産会, 1-31, 2011.
- 3) コンポスト化マニュアル, 社団法人日本有機資源協会, 74-80, 2004.
- 4) 染谷孝, 生ごみリサイクル講座 vol15 堆肥の微生物学, 月刊廃棄物, 41(9), 32-35, 2015.
- 5) 永田好男他, 三点比較式臭袋法による臭気物質の閾値測定結果, 日本環境衛生センター所報, 17, 77-89, 1990.

表1 調査年月日及び調査対象施設の概要

	施設A	施設B	施設C	施設D	施設E
調査年月日	H28. 7. 29	H28. 7. 22	H28. 10. 18	H28. 10. 19	H28. 10. 19
取扱品目	動植物性残さ、汚泥	動植物性残さ、汚泥、動物のふん尿等	動植物性残さ	動植物性残さ、汚泥、動物のふん尿	動植物性残さ、汚泥、動物のふん尿
施設の構造	堆積方式 通気型堆肥舎	堆積方式 通気型堆肥舎	攪拌方式 スクープ式	攪拌方式 スクープ式	攪拌方式 スクープ式
床下送風設備	有	有	有	有	有
建屋の構造	半密閉	密閉	密閉	密閉	密閉
脱臭設備	無(消臭剤散布)	木質チップ	木質チップ	木質チップ	木質チップ・土壌
切返し方法	ショベルローダー	ショベルローダー	スクープ式	スクープ式	スクープ式
切返しの頻度	週1回	週1回	週2回	1日5回	3日に1回
通常の入受量	約14t/日	60~80t/日	6t/日	3t/日	4t/日

	施設F	施設G	施設H	施設I	施設J
調査年月日	H28. 12. 7	H28. 12. 12	H29. 1. 26	H29. 2. 23	H29. 3. 2
取扱品目	動植物性残さ、汚泥、動物のふん尿	動植物性残さ、汚泥、動物のふん尿	動植物性残さ、汚泥	動植物性残さ、汚泥、動物のふん尿	動植物性残さ、汚泥、動物のふん尿
施設の構造	堆積方式 通気型堆肥舎	堆積方式 通気型堆肥舎	堆積方式 通気型堆肥舎	攪拌方式 スクープ式	堆積方式 堆肥舎
床下送風設備	有	有	有	有	無
建屋の構造	密閉	密閉	開放	密閉	密閉
脱臭設備	木質チップ	木質チップ	なし	木質チップ	木質チップ
切返し方法	ショベルローダー	ショベルローダー	ショベルローダー	スクープ式	バックホー
切返しの頻度	1日1回	4、5日に1回	3日に1回	1日1回	1日1回
通常の入受量	40t/日	22t/日	31t/日	15t/日	70t/日

表2 調査項目と分析方法

目的	項目	方法
発酵状態の 確認	堆積高	施設管理担当者へのヒアリング
	切返し、通気方法	
	副資材の種類及び混合比	
	堆肥化期間	
	日常の管理項目と方法	
	戻し堆肥、菌の添加	
	温度	バイメタル温度計
	湿度	堆積物表面から30cm(表層)と80cm(内部)で測定 温湿度計(堆積物表面に置き測定)
	混合物の比重(容積重)	バケツと重量計による現地測定
	混合物の水分	肥料等試験法3. 1. a (乾燥器による乾燥減量法)
pH	肥料等試験法3. 3. a (ガラス電極法)	
C/N比(炭素窒素比)	肥料等試験法4. 11. 2	
0-C(有機炭素)	肥料等試験法4. 11. 1. b (燃焼法)	
T-N(全窒素)	肥料等試験法4. 1. 1. b (燃焼法)	
混合物の大きさ・形状	目視	
臭気の確認	複合臭強度	においセンサー(新コスモス電機(株)製XP-329ⅢR) 複合臭の強度を0~2000の数値で相対的に表示
	アンモニア	検知管
	メチルメルカプタン	検知管
	硫化水素	検知管
	脂肪酸	GC/MS法

表3 GC/MSの測定条件

GC	Agilent 7890B	
MS	Agilent 5977A	
カラム	DB-WAX (30m×0.25mm, 0.25µm)	
注入口温度	250℃	
注入法及び注入量	スプリットレス(パージ開始1分後)、1µL	
ガス	He	
流量	1(mL/min)、コンスタントフロー	
昇温	40℃(2min)→10℃/min→230℃(5min)	
イオン源温度	230℃	
モード	SIM	
モニターイオン	定量イオン	確認イオン
酢酸	60	43、45
プロピオン酸	74	57
n-酪酸	60	73
iso-吉草酸	60	87
n-吉草酸	60	73
ヘキサン酸	60	73
ヘプタン酸	60	73
オクタン酸	60	73
ノナン酸	60	115
n-デカン酸	60	129
内部標準物質 (IS, 2-エチル酪酸)	88	73

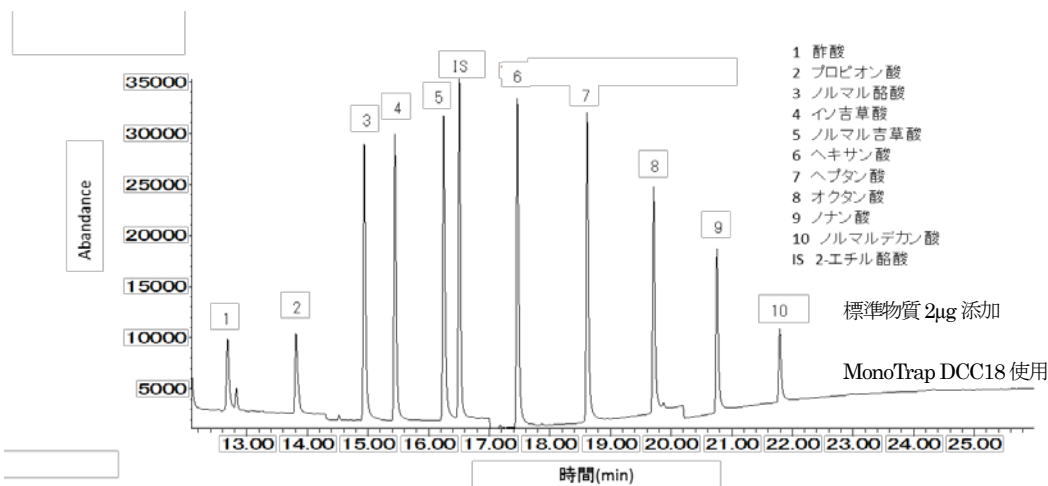


図1 標準物質のクロマトグラム

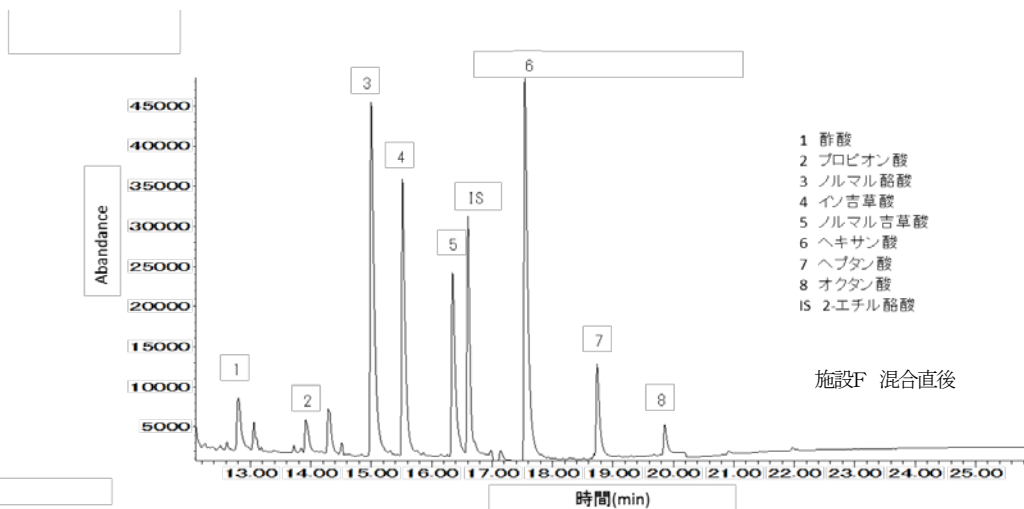


図2 実試料のクロマトグラム

表4 原料(廃棄物)の保管状況と臭気発生状況

	主な廃棄物			廃棄物の保管期間	においセンサー強度	アンモニア(ppm)	メチルメルカプタン(ppm)	硫化水素(ppm)	備考 受入時の条件、目視等
	動植物性残さ	汚泥	動物糞尿						
施設A	○	野菜くず、餃子餡	○	最長1週間*	690	4	<0.1	<0.05	15社に限定。水分をよくきるよう徹底
施設B	○	野菜くず、チーズ等	○	最長1週間	1,033	<0.5	<0.1	<0.05	特に限定なし。細断されていない野菜が散見された。
施設C	○	米ぬか、おから		0日	保管物がなかったため測定データなし			米ぬか・おからに限定	
施設D	○	野菜くず、ソーセージ	○	1~2日	1,050	70	<0.1	<0.05	30cm以内
施設E	○	野菜くず、乳製品等	○	0日	1,050	4	<0.1	<0.05	ローラーで混ぜた時すぐに崩れるもの
施設F	○	野菜くず、乳製品等	○	0日	990	24	<0.1	<0.05	野菜くずはカット野菜
施設G	○	お茶搾りかす、野菜くず	○	0日	1,160	13	0.2	1.5	性状を予め確認
施設H	○	野菜くず、コーヒーかす	○	3日	220	<0.5	<0.1	<0.05	野菜くずはカット野菜
施設I	○	野菜くず、残飯等	○	0日	760	50	<0.1	<0.05	水分をよくきるよう相手に依頼
施設J	○	野菜くず、おから等	○	0日	保管物がなかったため測定データなし			細断されていない野菜が散見された。	

*動植物性残さは戻し堆肥と混ぜて保管

表5 原料混合時の状態

	副資材	戻し堆肥	廃棄物：副資材・戻し堆肥の混合比率	廃棄物に占める動植物性残さの割合(%)	水分(%)	比重	C/N比	pH	温度(℃)	
施設A	○	バーク	○	1:1	10未満	63.0	0.41	17.5	7.7	79
施設B	○	バーク		1:2~4	20~30	70.7	0.46	9.1	4.1	33
施設C			○	1:0.05~0.1	100	50.6	0.43	14.5	5.1	62
施設D			○	1:0.5~0.6	10~20	41.1	0.77	7.0	7.7	52
施設E	○	おがくず	○	1:6~7	30	68.9	0.52	22.6	7.6	48
施設F	○	チップ材	○	1:1	25	61.5	0.45	10.3	7.0	42
施設G			○	1:4~7	10	66.6	0.63	7.9	7.4	51
施設H	○	おがくず、剪定材	○	1:0.2~0.3	3	74.1	0.71	10.3	6.6	15
施設I	○	カンナくず、もみがら	○	1:1	67	53.8	0.44	10.1	6.5	19
施設J	○	樹木チップ	○	1:0.3~0.4	57	71.3	0.50	14.1	5.9	29

表6 各施設の操作条件

	堆肥化期間	堆積高(m)	切返し		微生物等		備考 事業者の日常管理
			方法	頻度	戻し堆肥	菌添加	
施設A	4週間	2.3	ジョベルローター	週1回	○	乳酸菌、酵母菌、枯草菌	毎日温度測定
施設B	3ヶ月	3.5	ジョベルローター	週1回		乳酸菌、酵母菌、納豆菌	毎日温度測定
施設C	70日	1.5	スクープ式	週2回	○	枯草菌	毎日温度測定
施設D	20日	1.5	スクープ式	1日5回	○		毎日温度測定、水分測定
施設E	15日	1.5	スクープ式	3日に1回	○	乳酸菌	毎日温度測定、週3回アンモニア測定
施設F	5週間	2	ジョベルローター	毎日1回	○	乳酸菌、酵母	毎日温度測定、臭気対策のため菌噴霧
施設G	30日	3	ジョベルローター	4、5日に1回	○		毎日温度測定と臭気確認(官能)
施設H	18日	3	ジョベルローター	3日に1回	○		時々温度測定
施設I	90日	2	スクープ式	毎日1回	○	堆肥から分離した菌	毎日温度測定、水分測定
施設J	8ヶ月	3~5	バックホー	毎日1回	○		週1回温度測定、毎日臭気確認(官能)

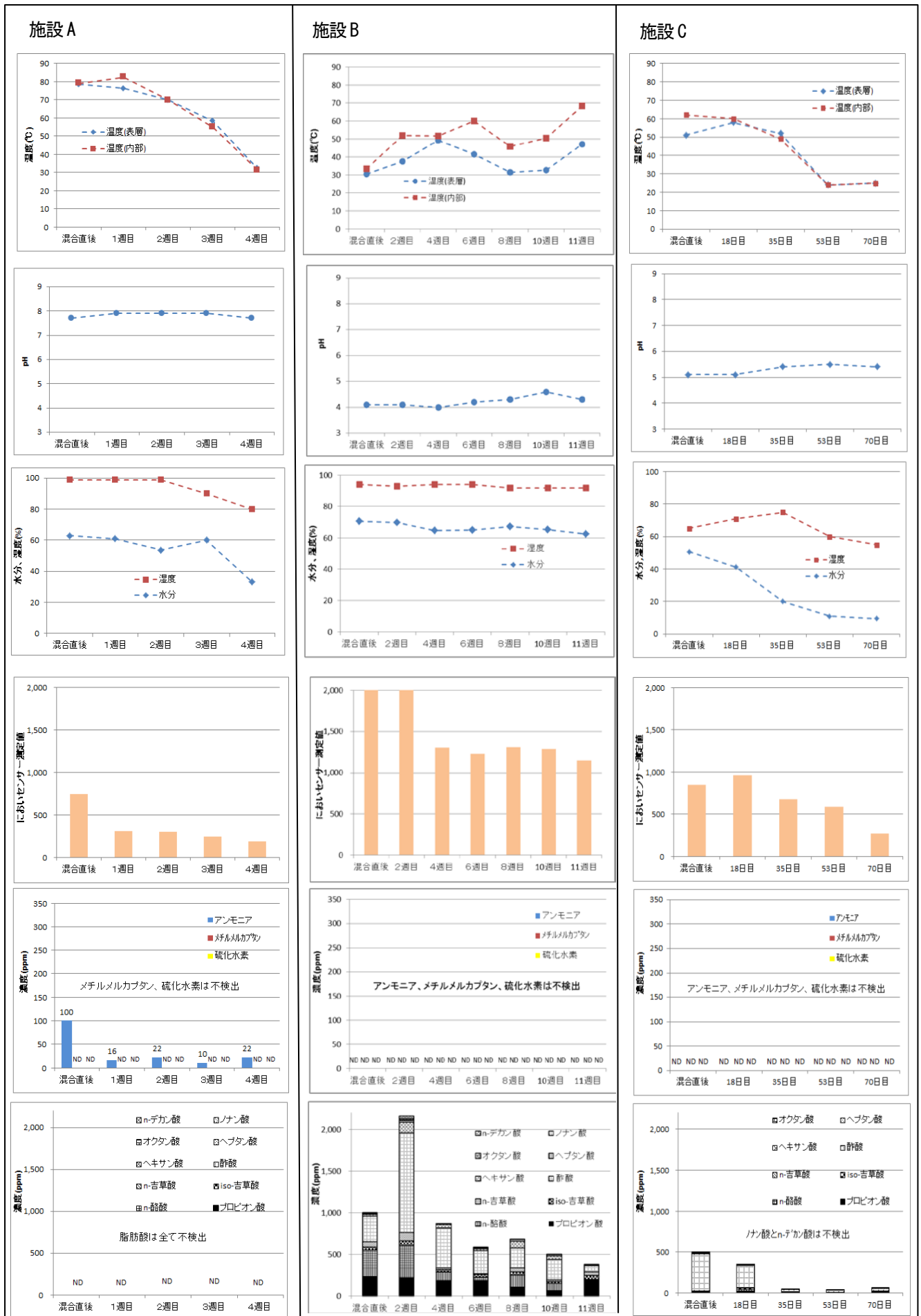


図3 堆肥化の状況と臭気発生状況 (1/4)



図3 堆肥化の状況と臭気発生状況 (2/4)

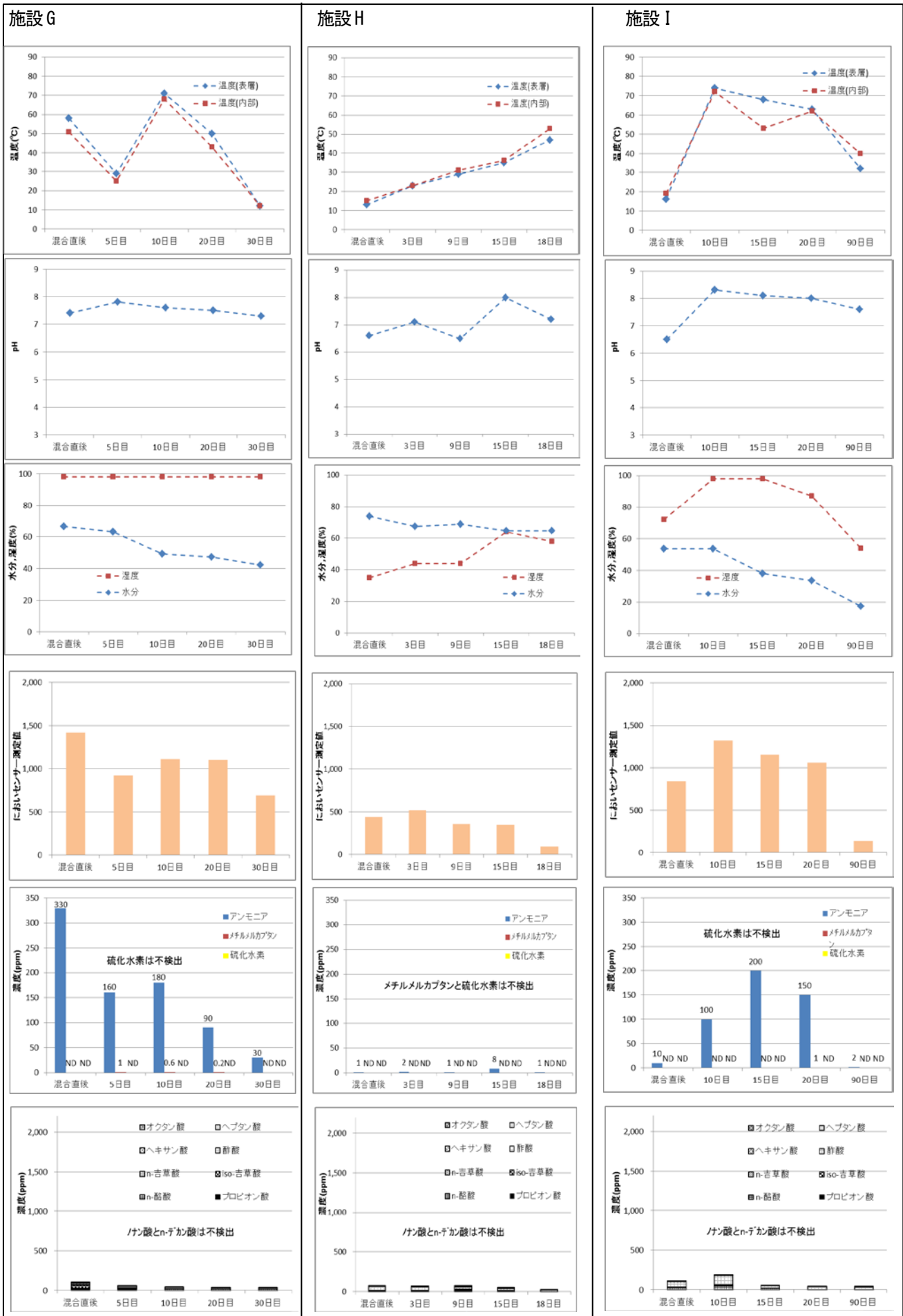


図3 堆肥化の状況と臭気発生状況 (3/4)

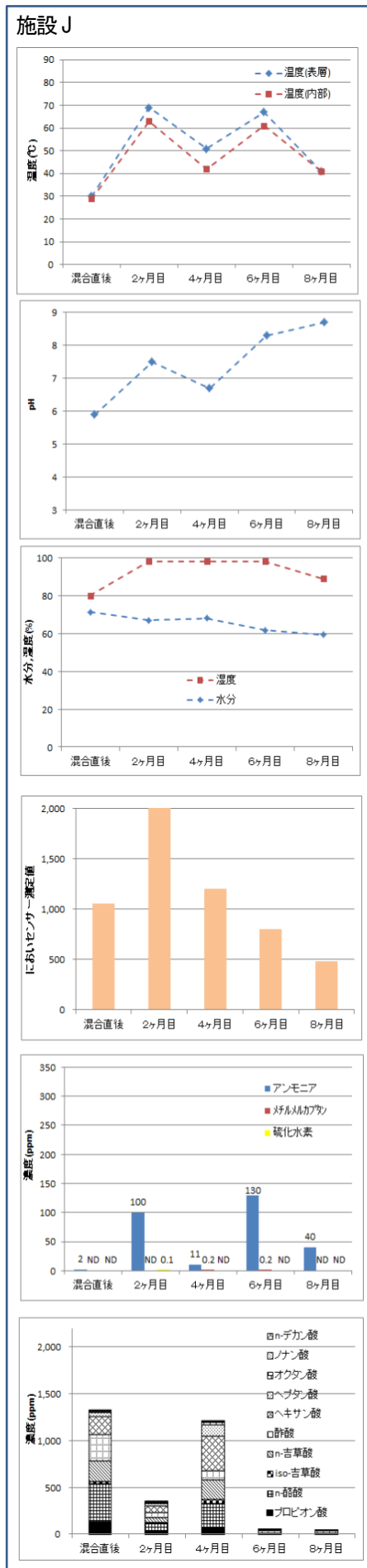


図3 堆肥化の状況と臭気発生状況 (4/4)