

5 コンポスト化技術の基本理論-注意すべき項目

ここではコンポスト化をスムーズに進めるために留意すべき項目のうち、まだ触れていない項目として、「pH」「C/N(炭素・窒素比)」「通気量」「切り返し頻度」「原料の形状(大きさ)」「空隙率」「容積重量(比重)」「発酵工程」について述べます。また、食品残渣、いわゆる食べ残しには調理時の食塩や油分が含まれており、この影響についても触れたいと思います。

5.1 pH

コンポスト化には最適な pH 範囲があり、pH4～9 程度であれば微生物が活発に活動し、良好な好気発酵が継続します。コンポスト化原料である生ごみの水分は通常 80%以上と高いため、生ごみの発生・保管・収集・運搬の間に嫌氣的雰囲気になることで有機酸が生成しますが、pH4～6 程度であり特に問題にはなりません。しかし、例えば柑橘系の果汁は pH が低く(レモン果汁は pH2 程度)、柑橘系の廃棄物が多量に混入するとコンポストは pH4 を下回ることがあります。このように低い pH になってしまうと微生物の活動が阻害されます。有機酸も有機物なので微生物が分解しますが長い時間が必要です。

下記に発酵床の pH が中性付近と乳酸の生成が原因となって pH4 以下になった時の発酵の様子を温度変化として示しています。pH が低いと生ごみの分解が遅くなっています。

早期にこのような低 pH を解消するには2通りの方法があります。

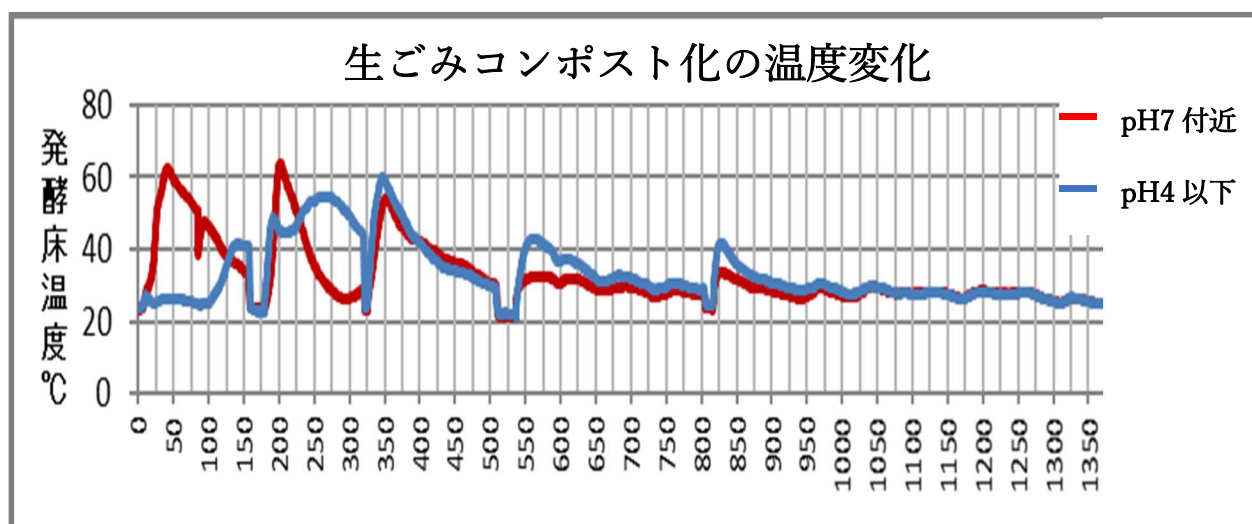


図 5-1 生ごみコンポスト化の進行と pH

5.1.1 リターンコンポストの活用

良好な好気発酵の場合は、アミノ酸やたんぱく質の分解によるアンモニアの生成とアンモニア

の硝化($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$)のバランスが保たれ、コンポストは弱アルカリとなります。コンポスト化の手法として、水分調整及び微生物の添加のために使用されるリターンコンポストを実施しますが、これは最適な pH 範囲に調整することにも役立ちます。

5.1.2 アルカリ剤の添加

コンポストセンターを立ち上げた当初はリターンコンポストがありません。また、大量の果汁残渣をコンポスト化している場合はリターンコンポストだけでは pH 調整できない場合があります。このときは石灰などのアルカリ剤を添加することで、最適な pH 範囲に調整します。ただし、混合が不十分であると局部的に高アルカリとなることがあるので、混合度合いに注意する必要があります。また、アルカリ剤の種類によっては反応性にも注意しないと、最適な pH 範囲に調整したつもりが、時間の経過とともに pH が高くなる場合があります。

5.1.3 汚泥コンポスト

汚泥をコンポストの原料として使用する場合は高 pH に注意する必要があります。汚泥化する時に脱水助剤として石灰が添加されていることがあり、pH10 以上になっている場合があります。pH8~9 程度まで下げる必要があり、リターンコンポストを添加する方法が有効です。また、柑橘系の有機酸を添加する方法もあります。

5.2 C/N(炭素・窒素比)

5.2.1 コンポスト化時の C/N

コンポスト化は微生物の働きによってなされるので、微生物が活動するためのエネルギー源と微生物が増殖して菌体を構成するための成分が必要です。これを表す指数として C/N(炭素・窒素比)があります。有機廃棄物に含まれる炭素は、微生物の活動エネルギーとして消費され、二酸化炭素として放出される炭素と、有機廃棄物中の窒素とともに微生物体内に取り込まれてタンパク質を形成し増殖する炭素として消費されます。

この時、炭素と窒素のバランスが重要です。C/N が高い場合は、活動エネルギーは多量にありますが微生物の増殖は限られてしまいます。そのため、数少ない微生物だけで有機物を一生懸命分解することになり、コンポスト化期間が長期化します。逆に C/N が低い場合は、微生物の数に比較して活動エネルギー量が少なく、また微生物の増殖も制限されます。その結果、窒素の無機化が促進され、 NH_4^+ の生成量が多くなって pH が高くなり、 NH_3 となって強いアンモニア臭が発

生したり、本来肥料成分としてコンポスト中に含まれるべき窒素成分が揮散したりします。

コンポスト化に適した C/N は 20～30 程度であり、有機廃棄物をこの範囲内に調整することでコンポスト化はスムーズに進みます。ただし、木質系の場合は C/N が 100～1,000 程度と高いため、40 程度になるように窒素分の多い家畜ふんなどを加えます。場合によっては尿素などの化学肥料を添加することもあります。

生ごみの場合は C/N が 20～30 の範囲に入っていることが多いので特に調整する必要はありません。しかし、コンポスト化が進行することで C/N が下がり、強いアンモニア臭が発生することがあるので、切り返し頻度を多くしたり通気量を増やしたりして、アンモニアの硝化($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$)を促すことが必要です。

C/N が 20 以下の場合は窒素成分が多くアンモニアの生成量も多くなり、アンモニアの硝化だけではアンモニウム臭を解消することができません。炭素分の高い資材と混合し適切な C/N に調整してコンポスト化します。

表 5-1 コンポスト原料の C/N(例)

種類	C/N	種類	C/N
牛ふん	15 ～ 25	みかんジュース かす	45
豚ふん	10 ～ 15	油かす	6 ～ 10
鶏ふん	6 ～ 10	もみがら	70 ～ 80
生ごみ	10 ～ 25	稲わら	50 ～ 60
米ぬか	20 ～ 25	麦わら	60 ～ 70
ビールかす	8 ～ 10	刈草	10 ～ 30
コーヒーかす	15 ～ 20	剪定くず	60
ココアかす	15 ～ 20	落ち葉(針葉樹)	40 ～ 60
魚・肉類	6 ～ 10	落ち葉(広葉樹)	15 ～ 40
野菜くず	10 ～ 25	バーク	500 ～
茶かす	10 ～ 15	おがくず	500 ～

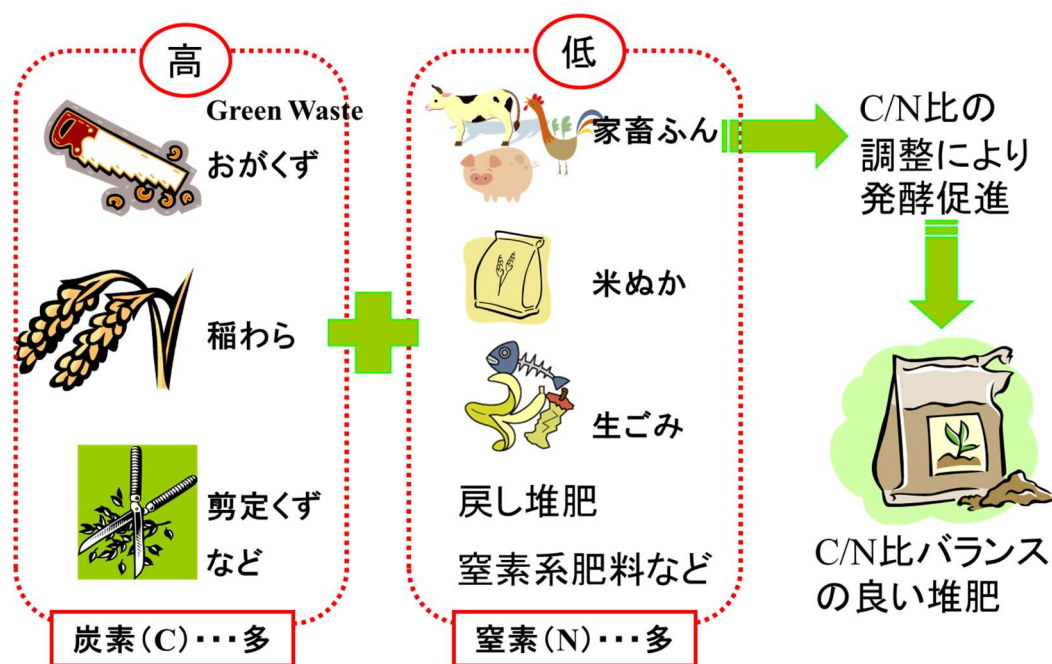
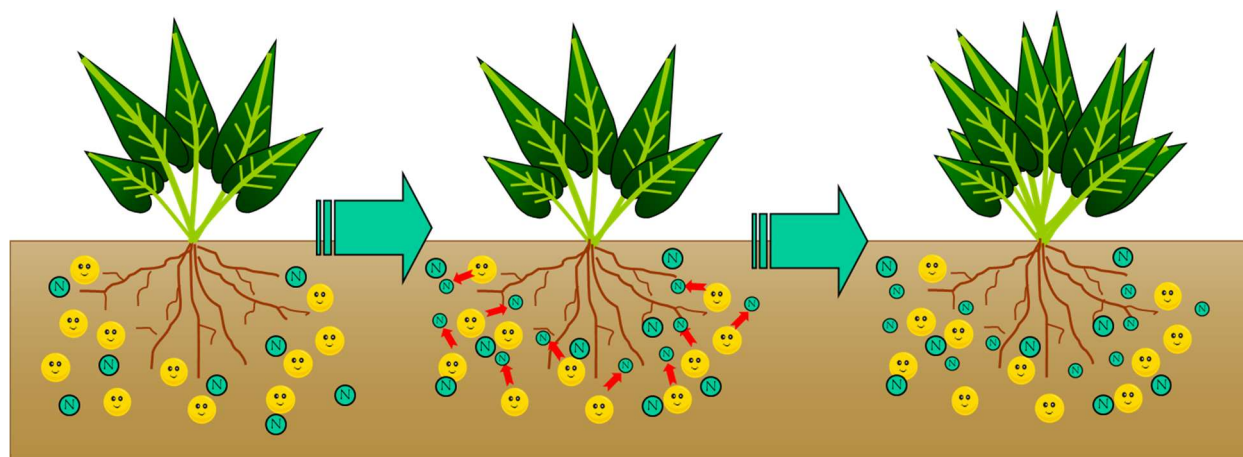


図 5-2 C/N から考えた良好な発酵と良質なコンポスト製造

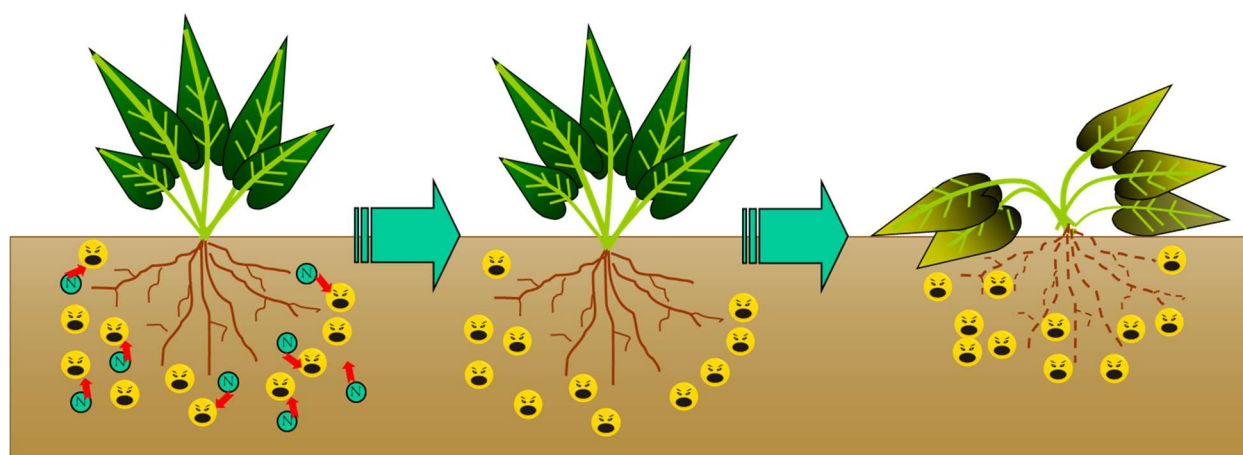
5.2.2 コンポスト製品の C/N

コンポスト製品の C/N は 10～20 が適しています。ただし、バーク(樹皮)のように C/N が高い原料を使用した場合は 35 以下とし、施肥時は C/N の低いコンポストや窒素系化学肥料を添加したり、土壌改良を主目的とする施肥方法を採用することになります。

コンポストを土壌に施肥後、土壌中及びコンポスト中に生息する微生物はコンポストを栄養源として活発に活動を始めます。この時、コンポストに含まれる炭素の 2/3 は微生物活動のエネルギーとして消費され、呼吸として二酸化炭素が放出されます。残りの 1/3 は微生物体内に取り込まれ増殖します。微生物体の C/N は 6.7 程度であり、例えば C/N20 のコンポストを施肥したとすると呼吸に 13.3 の炭素が利用され、残りの 6.7 が微生物増殖用に使用されます。結果的には C/N は 6.7 となり、微生物体と同じ比率になります。次に C/N40 のコンポストを施肥した場合を考えます。呼吸に 26.6 の炭素が利用され、残りの 13.4 が微生物増殖用に使用されますが、微生物の増殖にとっては窒素が不足しています。その結果、本来植物が利用すべき土壌中の窒素を消費したり、微生物が植物の細根をアタックして窒素分を得ようとしたりすることになり、植物の成長にダメージを与えてしまいます。このような現象を「窒素飢餓」と言います。



施肥するコンポストが適切な C/N であれば、植物の成長に必要な N を放出する。



C/N が高いと窒素飢餓を引き起こす場合がある。

図 5-3 コンポストの C/N が植物栽培に及ぼす影響

5.3 通気(エアレーション)

5.3.1 送風機によるエアレーション(強制通気)

機械的にエアレーションすることで効率的に好気発酵を促すことができます。生ごみや牛ふんなどの易分解性有機物の場合は、短期間(例えば 1 日程度)で温度が 70°C を越え、急速なコンポスト化が進むこともあります。その結果、早期に汚物感がなくなり悪臭の発生を抑制することも可能です。

エアレーションはファンを連続して運転する連続式と、例えば 1 時間運転、2 時間停止などの交互運転による間欠式があります。通気量が増すと放熱量も多くなり温度上昇や高温の維持ができなくなるので、ファンの回転数を制御したり、ファンの運転時間を変えたりすることで通気量を調整します。水分が若干多い程度であれば乾燥した副資材を混ぜずに、通気量を増すことで水

分を蒸発させ、水分調整することもあります。



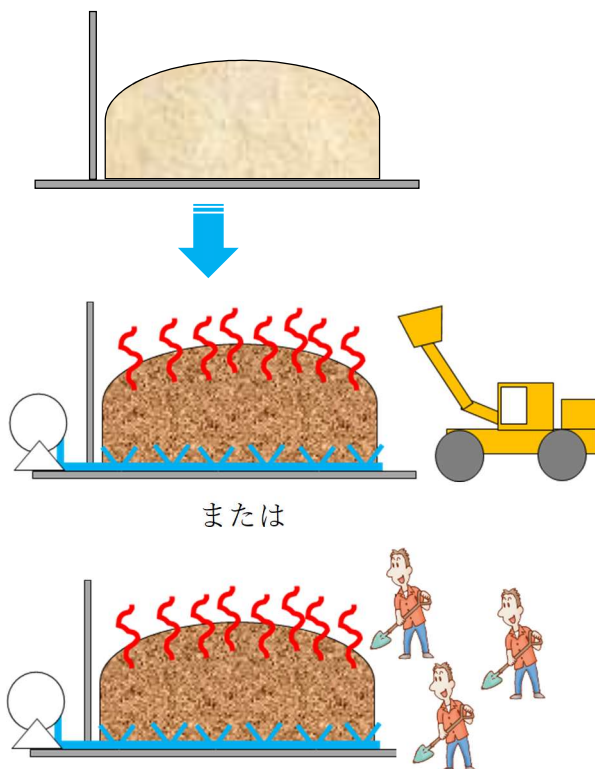
写真 5-1 エアレーション用送風機



写真 5-2 エアレーションパイプ

牛ふんのコンポスト化を例にすると、堆積高さが 1m 以上の場合、電気代なども考慮して通気量 $100 \text{ l / 分} \cdot \text{m}^3$ 以上を採用しているケースが多いようです。

このように通気量は一律ではなく、コンポスト材料の性状やコンポスト化の状況に合わせて調整する必要があります。また、均一なコンポスト化を促すためには、エアレーションに合わせて切り返し(攪拌)も必要です。



エアレーション・切り返し(攪拌)無し

- ・コンポスト化は進行しない。
- ・内部は嫌気状態で悪臭がする。

エアレーション有り

- ・効率的に好気発酵を促し温度が上昇する。
- ・でも過剰な通気は温度を下げ逆効果。
- ・切り返し(攪拌)で均一なコンポスト化を促す。
- ・切り返しは手作業でも可能

図 5-4 エアレーションの必要性

下図にコンポスト化の温度推移の例を示します。適切なエアレーションと切り返しにより良好な発酵がなされています。しかし、堆積するだけでは全くコンポスト化は進行していません。

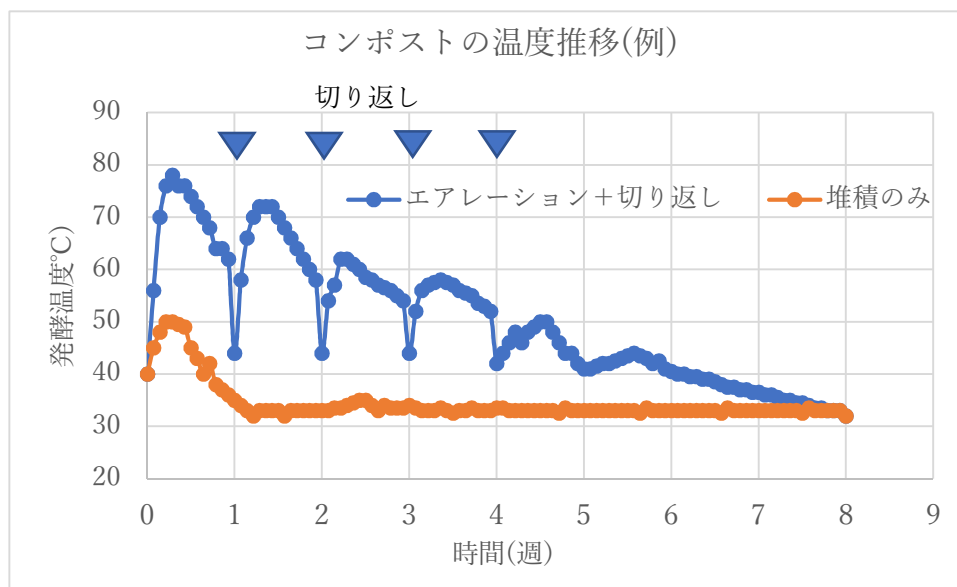


図 5-5 コンポスト化の進行と温度変化

5.3.2 切り返し(攪拌)

機械的にエアレーションするためには、設備の導入とファンを稼働するための電気エネルギーが必要でありコスト高になります。この代替方法として、ショベルローダーや人力による切り返し(攪拌)があります。十分な酸素量を供給するためには頻繁に切り返す必要がありますが、温度低下と人力による作業量が多くなってしまうので、現実的には1回/日または1回/2日の頻度で切り返すケースが多いようです。

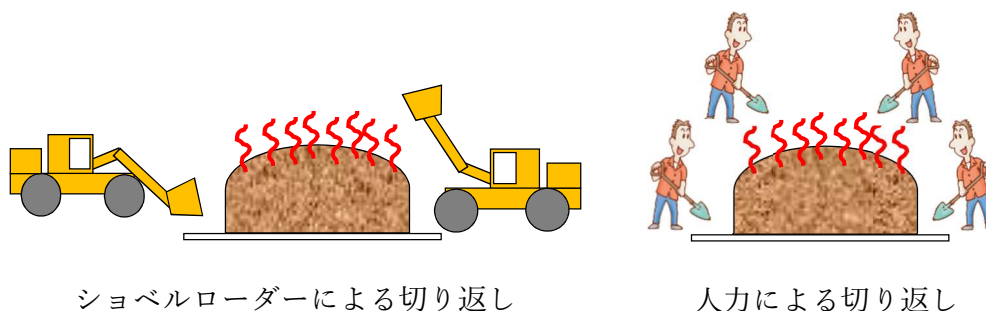


図 5-6 コンポストの切り返しの方法

下図にコンポスト化の温度推移の例を示します。適切なエアレーションと切り返しにより良好な発酵がなされています。しかし、堆積するだけでは全くコンポスト化は進行していません。

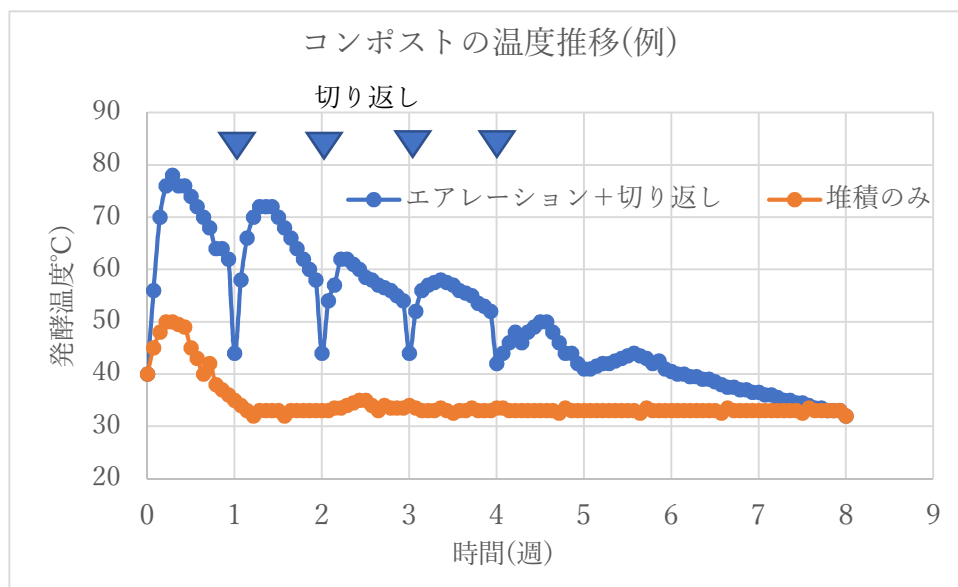


図 5-5 コンポスト化の進行と温度変化

5.3.2 切り返し(攪拌)

機械的にエアレーションするためには、設備の導入とファンを稼働するための電気エネルギーが必要でありコスト高になります。この代替方法として、ショベルローダーや人力による切り返し(攪拌)があります。十分な酸素量を供給するためには頻繁に切り返す必要がありますが、温度低下と人力による作業量が多くなってしまうので、現実的には1回/日または1回/2日の頻度で切り返すケースが多いようです。

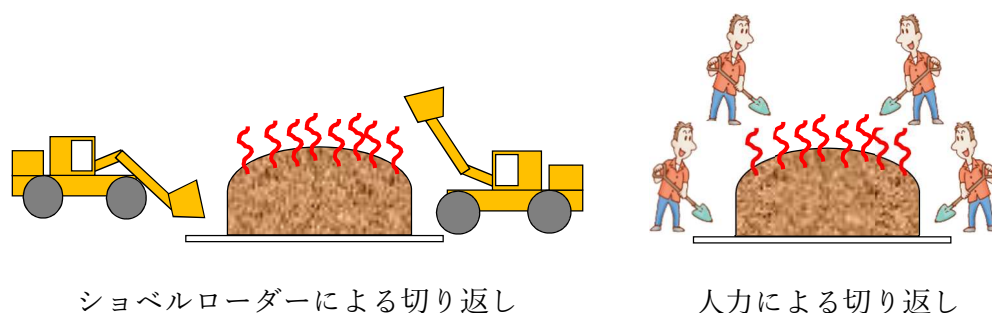


図 5-6 コンポストの切り返しの方法

5.4 原料の形状

好気発酵を促進させるためには、原料表面に効率よく微生物を接触させ、十分に酸素を供給す

ることが必要です。そのために、原料を破碎するなどして粒径を1cm程度の大きさにすると効果的です。一方で粒径が小さかったり、形状に厚みが無かったりすると堆積物の空隙が確保できず、通気性が悪くなってしまいます。この場合は通気性を高めるために、もみ殻、おがくず、稲わら、麦わらなどの形状のしっかりしたものを副資材として添加します。

しかし、原料と副資材の混合物を2.0m程度まで積み上げる堆積発酵法では、底部は自重による圧密で空隙がつぶれやすくなります。また、水は重力により底部に集まりやすく水分が高くなる傾向にあるので、水分は低め(40～50%程度)に管理して好気発酵が継続するように注意する必要があります。

5.5 空隙率と容積重(比重)

空隙率と比重は相関があり、同じ混合物であれば空隙率が高くなると比重は小さくなります。容積重の測定方法は、写真のように一定容積のバケツなどに混合物を充填し、重量を計測することで簡便に知ることができます。コンポスト化スタート時の容積重をできるだけ500g/リットルに調整することで通気性がよくなり、発酵がスムーズにスタートし温度上昇が速くなります。



写真 5-3 比重測定による空隙率の管理

この空隙はコンポストの積み上げ高差が高くなると、底部は圧密によりつぶれてしまいます。エアレーションを切り返しだけで実施する場合は、積み上げ高さは1.5～2m以下に管理します。

5.6 塩分の影響

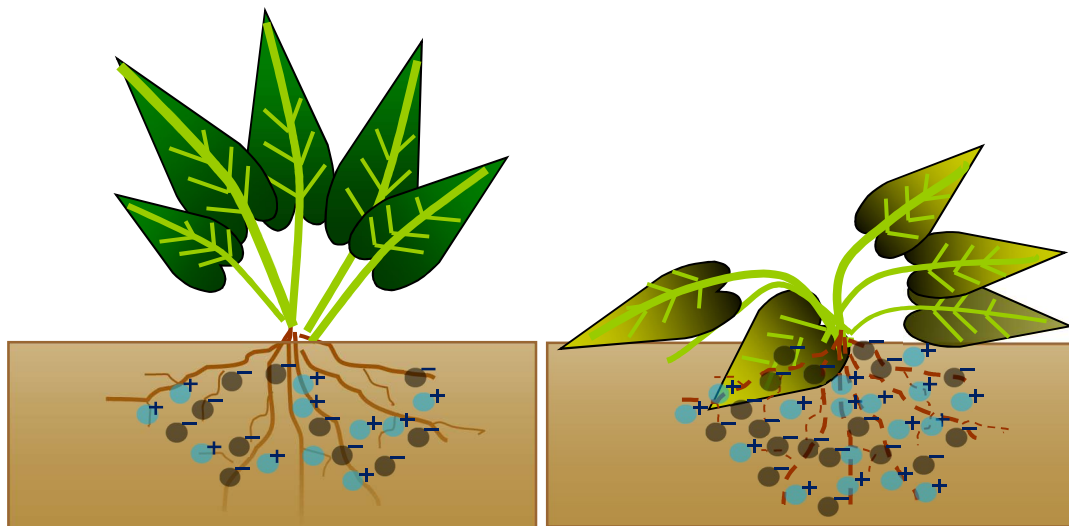
塩分のコンポスト化に対する影響については、塩分濃度の高い生ごみ(塩漬け、味噌など)を大量に混合しない限りは問題ありません。様々な地域で生ごみコンポストに取り組まれ、できたコンポストが使用されていることから納得できると思います。それよりも、できたコンポスト中の食塩(塩化ナトリウム)が植物の生育に悪影響を与えるのではないかと懸念されているところです。コンポスト中の食塩含有量の許容限界はNaClとして5%以内を推奨しているデータもあります。

塩化ナトリウムは水に溶解すると、 Na^+ (ナトリウムイオン)と Cl^- (塩化物イオン)のイオン状になります。実は食塩だけでなく、水に溶解している肥料成分でもある硝酸態窒素(NO_3^-)やカリ

ウム(K^+)なども含め、イオンの量が多くなる(電気伝導率が高くなる)と植物の生育に悪影響を与えます。例えばコマツナ種子の発芽試験による発芽率が悪くなります。また、土壤微生物の活動が低下するとの報告もあります。NaCl の測定は分析センターで実施するなど手間と時間を要するため、現場では NaCl も含めて評価することができる電気伝導率で管理することになります。

牛ふん堆肥の電気伝導率(EC)の管理値は 5mS/cm 以下であり、この数値をコンポストの品質管理値とするケースが多いようです。また、電気伝導率(EC)が高いとコマツナ種子の発芽率が低下するので、発芽試験の発芽率 80%以上で管理する場合もあります。

ここで注意点があります。イオン状の物質は水に溶解している状態で存在するので、降雨量や散水量によって植物への影響の度合いが異なります。植物の生育環境で降雨量が少なかったり、ビニールハウスや鉢栽培などで散水(灌水)量が制限される場合は、土壤中の電気伝導率が高くなってしまいます。すなわち、電気伝導率 5mS/cm 以下、コマツナ種子発芽率 80%以上のコンポストであっても、植物の生育に影響を及ぼすことがあります。また、この逆の場合である降雨量が多い、または十分に散水することで、電気伝導率が高いコンポストであっても、障害無く植物が生育することになります。生ごみを原料とするコンポストは塩化ナトリウムを含みやすいので、露地栽培で使用することを基本とすべきです。



土壤の電気伝導率が高くなると生育障害が起きる

図 5-7 コンポストの塩分だけでなく電気伝導率に注目

5.7 油分の影響

油分(脂質)はコンポスト化プロセスの第1段階の対象物質であり、易分解性有機物に該当します。しかし、形状が液状の植物性油脂と固体状の動物性油脂とでは、植物性油脂の方がコンポスト内で広く分散するので、おのずと分解は速くなります。温度が高まると動物性油脂も広がりやすくなるので、発酵温度が高いと分解に有利になります。

また、食用油を添加した生ごみコンポストを使用したコマツナのポット栽培試験の事例があり、「油脂分が残存しているコンポストでは油脂分による発芽抑制や窒素無機化の遅延による生育障害が懸念される。そして、油脂分の分解指標として pH を挙げており、コンポストが pH7 以上では油脂分含有率が極めて低く、pH8 以上では油脂分に起因する悪影響は極めて低いと考えられる。」と評価されています。

良好に好気発酵していると脂質は H_2O と CO_2 に分解されます。十分に分解していない場合は、代謝物として有機酸が残るため酸性になります。

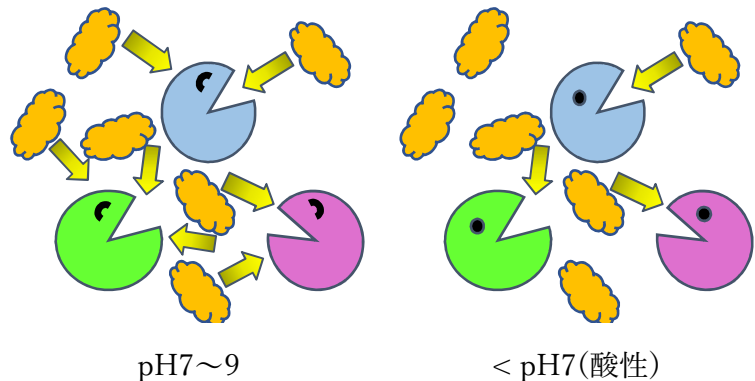


図 5-8 油脂分は微生物の美味しい餌。分解が進んでいると pH7~9、分解が悪いと酸性になる。

す。先にも述べましたが、「良好な好気発酵の場合は、アミノ酸やたんぱく質の分解によるアンモニアの生成とアンモニアの硝化($NH_4^+ \rightarrow NO_3^-$)のバランスが保たれ、コンポストは弱アルカリとなる。」と符合しています。すなわち、良好な発酵がなされることで油脂分は悪影響を与えない程度まで分解されます。

5.8 コンポスト化の発酵工程

コンポスト化に係わる考え方の基本部分は共通していますが、発酵工程の分け方は統一されていません。前述した「一次発酵・二次発酵」と「第一段階・第二段階・第三段階」以外に、「未熟コンポスト・中熟コンポスト・完熟コンポスト」の考え方もあります。

5.8.1 「一次発酵・二次発酵」

有機物の分解を多量の発酵熱が生じる期間と、発酵熱の発生が落ち着き安定化する期間として分けています。

(1) 一次発酵：

主に易分解性有機物が急激に分解され、多量の発酵熱が生じ温度が上昇します。

(2) 二次発酵：

可分解性有機物の分解と腐植化が進行し、安定化します。一次発酵から二次発酵への移行の一般的な目安としては、一次発酵で2週間以上の発酵期間を経過し、品温が50℃を超えなくなった段階とします。

(一次発酵設備で2週間以上の発酵期間を経過し、品温が65℃を超えなくなった段階を目安とする場合もありますが、一次発酵のみで製品として出荷される場合もあるので、コンポスト化が進行し品温が低くなった50℃を採用しました。)

5.8.2「第一段階・第二段階・第三段階」

発酵に係わる微生物の変遷から有機物の分解の段階の様子を表しています。

(1) 第一段階：

易分解性有機物を分解する段階です。細菌と糸状菌が優占種となって易分解性有機物を利用して活発に活動するので、適切な酸素の供給が必要であり、急激な温度上昇がみられます。

(2) 第二段階：

ヘミセルロース・セルロースを分解する段階です。第一段階で生じる高温の水蒸気によって、ヘミセルロースとセルロースが蒸されることで分解されやすくなります。この時、高温好気性の放線菌がセルロースを保護しているヘミセルロースを分解し、嫌気性のセルロース分解菌がセルロースを分解します。また、その他の細菌や糸状菌もセルロースを分解します。また、色は褐色化が進行します。

(3) 第三段階：

リグニンを分解する段階です。担子菌(キノコ)がリグニンをゆっくりと時間をかけて分解するため、温度は少しずつ下がります。温度が下がることで常温菌類が活性化し、多様な微生物が繁殖するようになり、黒色でパサパサした感触です。また、コンポストの表面近くには、白色のカビや放線菌が増殖している様子を見ることがあります。

5.8.3「未熟コンポスト・中熟コンポスト・完熟コンポスト」

有機物の腐熟の程度で分けています。

(1) 未熟コンポスト：

易分解性有機物が未分解の状態です。この状態で施肥すると、土壤中で様々な微生物が栄養源として利用することができるため、土壤中に病原性糸状菌類などの病原菌が蔓延することがあります。また、土壤中で易分解性有機物が急激に分解するため、ガスの発生と発酵熱により植物根を痛めたり、土壤中で急激に微生物が増殖すると土壤中の窒素を奪い窒素飢餓を起こすことがあります。未熟コンポストの使用に当たっては経験とテクニックが必要であり、基本的には使用されません。

(2) 中熟コンポスト：

急激に分解する有機物の分解は終わり、比較的分解しやすい有機物がまだ残っている状態です。コンポストの微生物濃度が高く土壤中でも活動するため、これを施肥することで土壤の団粒化を促進し、土壤改良効果が高いので、それを目的に好んで使用されることもあります。施肥してから作付けまで少し期間をあけるなどの注意が必要です。

(3) 完熟コンポスト：

易分解性有機物が完全に分解したが、分解しにくいものはまだ残っている状態です。コンポストの温度は下がり、切り返しをしても温度はさほど上がりません。肥料成分の無機化が進み、土壤中での微生物の活動は穏やかであり、土壤改良効果は中熟コンポストよりも劣りますが、扱いやすいコンポストといえます。

コンポスト化工程の「第一段階・第二段階・第三段階」、「未熟コンポスト・中熟コンポスト・完熟コンポスト」、「一次発酵・二次発酵」の関係は明確にはできませんが、およそ次のように図で表現できます。

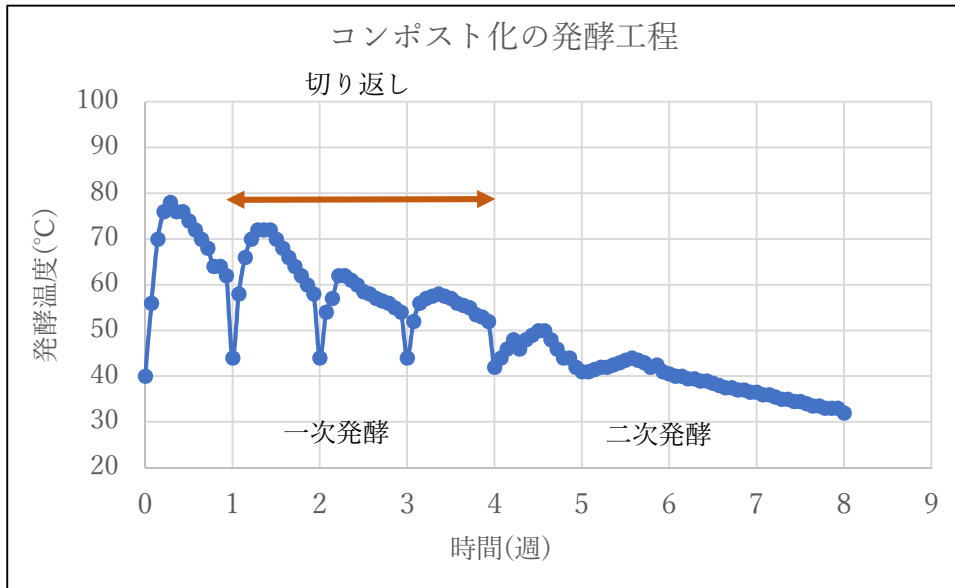


図 5-8 コンポスト化の発酵工程

5.8.4 コンポスト化終了の判断

コンポスト化はどの時点で終了と判断することができるのでしょうか？

一般的にコンポストには「完熟」が望ましいとされており、コンポストの品質評価も完熟の点から判断する手法が多数提案されています。その一方で、コンポストを利用する側のニーズの点から判断すると、必ずしも完熟を求めている場合も多くあります。生に近い未熟コンポスト、一次発酵を終えた中熟コンポストなど様々なニーズがあります。詳しくは後の「土づくり」で述べますが、私は中熟コンポストが適していると考えています。中熟コンポストであれば、土壌へ施肥後もコンポスト中に残っている有機物を微生物が利用して活動するので、コンポストの効能である「土壌改良」を引き出す力が強いと考えているからです。すなわち、中熟コンポストとして早めにコンポスト化を終了させ、施肥後に土壌中で完熟させることで、微生物活動による土づくりを積極的に利用することができます。

この時、中熟コンポストの取り出しは、品温が 50°Cを超えなくなった段階を一つの目安(一次発酵の終了目安と共通)とすることが分かりやすいと考えています。

ここでコンポスト化の温度変化を観察する時の注意点があります。

堆積されたコンポストは断熱効果が高いため熱が逃げにくく、微生物活動が低下して熱の発生が少なくなっても温度が下がりにくくなります。すなわち、「コンポストの温度が高く維持されている」＝「微生物活動が大きく発酵が盛んに起きている」とは限りません。

具体例としては、堆積式で切り返しもエアレーションも実施しなければ、堆積後1ヶ月を経過しても堆積層内の温度が70℃と高い温度を維持し続けることがあります。これは発酵が促進されているわけではなく、単に放熱が少ないためです。

コンポスト化は必要以上に温度が高い状態を維持することが良いとは限りません。適切なエアレーションや切り返しをして放熱することも大切です。

参考資料：

- ・ 高倉弘二：海外技術協力を通じた高倉式コンポストの技術移転に関する研究, 九州工業大学大学院生命体工学研究科博士論文, 2016年5月
- ・ 藤原俊六郎監修, 農文協編：家庭でつくる生ごみ堆肥, 農山漁村文化協会 1999年
- ・ 松崎敏英：土と堆肥と有機物, 家の光協会 1992年
- ・ デボラ・L・マーチン, グレイス・ガーシャニー, 岩田進午監訳, 佐原みどり訳：家庭でできる堆肥づくり百科, 家の光協会 2004年
- ・ 金沢晋二郎：コンポスト腐熟過程における有機物の変化ならびにその評価, 水質汚濁研究 vol9No. 5, 1986年
- ・ 藤原俊六郎：堆肥のつくり方・使い方, (社)農山漁村文化協会 2003年
- ・ 公益財団法人 地球環境戦略研究機関：Composting for Waste Reduction INFORMATIONKIT, 2010年
- ・ 南房総市：Ⅲ堆肥の製造手法
- ・ 西尾道徳：土壌微生物の基礎知識, 社団法人 農山漁村文化協会
- ・ 加藤哲郎：土壌・肥料の基本とつくり方・使い方, 株式会社ナツメ社