

堆肥化反応における水分の限界に関する研究

THE MOISTURE LIMIT FOR OPTIMUM COMPOSTING

金子栄廣*・藤田賢二**

By Hidehiro KANEKO and Kenji FUJITA

Moisture content is usually used to evaluate the state of water in compost and it is a useful operational parameter. However it does not describe the state of water in terms of microbial activity, hence the upper and lower moisture limits for composting are indefinite.

In this paper, relationship between water activity (a_w), which is numerically equal to the equilibrium relative humidity expressed as a decimal fraction, and respiratory activity was experimentally examined with several materials. The results show that water activity is useful as an index of lower moisture limit and a common standard, $a_w=0.94$, is proposed. Air flow tests were also performed with the materials of different moisture content. The results indicate the moisture content which causes clogging of air supply in compost layer is an upper moisture limit.

1. 緒 論

高速堆肥化（コンポストイング）は、都市廃棄物や下水汚泥等の有機性廃棄物の処理方式として注目されている。この方式の特長は、原料である廃棄物中の易分解性有機物を微生物により分解、安定化することにより、農地等への還元が可能な製品が得られることにある。しかし、現時点においては、解決すべき問題点が数多く残されており、中でも、反応を速やかに行わせるための環境因子の制御方法の確立が急がれている。

著者らは、一次発酵過程における水分の影響に着目し、実験室規模の実験を行い、主として動力学的側面から検討を加えてきた。その結果、①温度を一定に制御し、十分に通気を行った場合、含水率を50～60%に保つことにより反応速度を最大にできること、②堆肥化を行うことのできる水分量には上限および下限があること、③含水率や含水比を水分の指標として用いた場合、堆肥化を正常に行うことのできる水分の範囲が原料によって異なることなどを確認した^{1),2)}。

一方、現実には、処理コストならびに製品等の輸送コストの低減、装置の小型化などを促進するため、可能な限り水分の多い原料を受け入れることができ、また、可能な限り水分の少ない製品が作れるような装置および運転管理法の開発が望まれている。したがって、最適水分量よりも、堆肥化が可能な水分の上限および下限に関する情報の方が重要な意味をもつといえる。

そこで、本研究においては、以上の点を考慮し、水分管理に関する検討を行った。

2. 低水分領域における反応速度

製品コンポストの水分を減らすことは、輸送コストを低減させるとともに、製品を農地等へ還元する際の作業性を向上させる、すなわち製品の価値を高めるという効果がある。しかし、堆肥化が微生物反応であるため、水分を減らし過ぎると微生物の活性が低下し、反応速度の低下あるいは反応停止を起し、製品の品質を悪化させる。したがって、一次発酵過程においてどこまで水分を低下させても差し支えないかという点について検討する必要がある。

また、先に述べたように、含水率や含水比を水分の指標とした場合、原料によって堆肥化に必要な水分量の下限が異なるという問題がある。したがって、微生物の活

* 正会員 工博 東京大学助手 工学部都市工学科
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部都市工学科
(同上)

性を反映し得る汎用性のある水分の指標を導入する必要がある。本章では、“水活性” (water activity) を水分の指標とし、これと微生物の活性との関係について検討することとした。

(1) 基礎式

微生物が活動するためには十分な水分が必要であり、物質が高濃度で存在する状況では微生物の活性が低くなる。このような観点から、いくつかの研究において水活性と微生物の増殖速度との関係が論じられている^{3),4)}。そこで、この考えをコンポストに適用する。

水溶液の水活性 a_w は次のように定義されている⁵⁾。

$$a_w = p/p_0 \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 p および p_0 は、それぞれ、同一温度下における水溶液の飽和蒸気圧および水の飽和蒸気圧である。

また、溶液中の物質と蒸気圧との関係は Raoult の法則⁶⁾に示されている。すなわち、理想溶液において、溶質のモル数を n_1 、溶媒のモル数を n_2 とすれば、

$$\frac{p_0 - p}{p_0} = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \dots\dots\dots (2)$$

という関係が成り立つ。そこでこれを変形し、式 (1) に代入すると、水活性と物質ととの関係式が得られる。

$$a_w = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \dots\dots\dots (3)$$

この式より、水活性が溶液の濃度の関数となっていることがわかる。しかし、この関係をコンポストに適用する場合、次のような配慮を要する。まずコンポストのように溶質が単一でなく分子量が明確でない物質に対しては、溶質および溶媒の量的関係をとらえるのにモル数を用いた表現では不便なため、質量を用いた表現に変える必要がある。また、固相と液相が混在するため、式 (3) 中の溶質として水相に溶解している物質を用いなくてはならない。

そこで、水の分子量を M_w 、溶解している物質の平均分子量を M_s とし、式 (3) 中の溶質のモル数 n_1 を溶解している物質質量 m_s に、溶媒のモル数 n_2 を水の質量 W にそれぞれ置き換えると次のようになる。

$$a_w = \frac{W}{m_s M_w / M_s + W} \dots\dots\dots (4)$$

さらに、水分量を含水比 w を用いた形に直すと次のようになる。

$$a_w = \frac{W}{x M_w / M_s + w} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 x は溶解している物質の乾燥質量に対する割合である。

(2) 実験方法

a) 水活性の測定 水活性と含水比との関係を調べるため、あらかじめ含水比を調整した試料の水活性を

Fig. 1 の装置により求めた。この装置は、広口ビン内に封入した試料の飽和蒸気圧 p およびその温度下における水の飽和蒸気圧 p_0 を測定できるようになっている。そこで、その結果を式 (1) に代入し、水活性を算出した。

b) 微生物の活性の測定 好気性発酵では微生物の増殖に伴って酸素が消費される。特に、反応が最も盛んな、いわゆる対数増殖期において、菌体増殖のために消費される酸素量が菌体を維持するために消費される酸素量に比べてはるかに多いとみなせば、この期間における微生物の増殖速度と酸素消費速度との間に次のような関係が成り立つと考えられる。

$$dO_2/dt = Y_0 dX/dt \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 O_2 は累積酸素消費量、 Y_0 は比例定数、 X は菌体量である。したがって、酸素消費速度から微生物の活性を知ることができる。

累積酸素消費量の測定装置を Fig. 2 に示す。この装置は、ビン内の試料の酸素消費に伴って発生する二酸化炭素をアルカリに吸収させることにより、酸素消費量を圧力変化としてとらえることができるようになっている。

次に、このようにして求めた酸素消費量と時間との関係から酸素消費速度を求める。本来は、酸素消費速度自体が経時変化をするので、各時点における酸素消費速度を計算しなくてはならない。しかし、測定結果 (Fig. 5) にみられるように、酸素消費量の測定開始直後の数時間にみられる酸素消費が少ない時期と、それ以後の酸素消費量と時間とが直線関係になる時期とが存在する。そこで、測定開始後数時間のデータを捨て、時間と酸素消費量とが直線関係になっている部分について酸素消費速度を算出した。

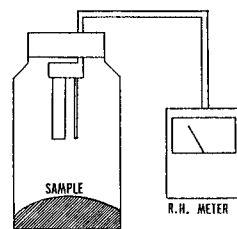


Fig. 1 Relative humidity meter.

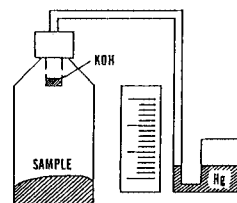


Fig. 2 Respiration apparatus.

Table 1 Materials and Experiments.

Sample	Contents	a_w	dO_2/dt	ΔH
SAMPLE S	sawdust + dog food	o	o	o
SAMPLE N	newsprint + dog food	o	-	o
SAMPLE D	dog food	o	o	-
SAMPLE M	sewage sludge compost	o	o	-
SAMPLE R	human waste sludge compost	o	o	-
SAMPLE F	sawdust (under 1.41mm)	-	-	o
SAMPLE C	sawdust (1.41 ~ 2.0mm)	-	-	o
COMPOST S	compost of SAMPLE S	o	-	-

o : carried out - : not carried out

以上のようにして、あらかじめ水分を調整した試料の酸素消費速度を測定することにより、水分量と微生物の活性との関係を把握できる。

c) 試料 実験に用いた試料および測定項目を、Table 1 に示す。

(3) 結果と考察

a) 水活性と水分量との関係 従来、堆肥化過程における水分管理を考える場合、水分量を表わす指標として含水率や含水比が用いられてきた。したがって、新しい指標として水活性を導入するに際し、これらの相互関係を調べる必要がある。そこで、各試料に対して水分量を変えて水活性を測定した。その結果を Fig. 3 に示す。

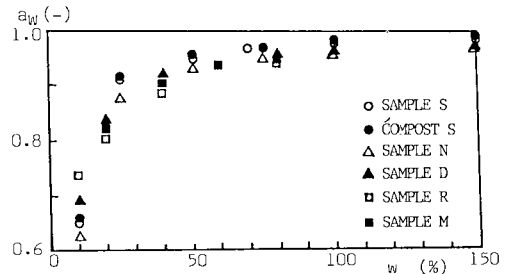


Fig. 3 Relations between w and a_w .

次に Raoult の法則より導出した式 (5) をコンポストに適用できることを確認する。式 (5) を

$$w/a_w = w + xM_w/M_s \dots\dots\dots (7)$$

のように変形し、これに準じて各試料の含水比と実測値より求めた w/a_w との関係を調べると Fig. 4 のようになった。これより、どの試料においても w と w/a_w とが直線関係にあること、すなわち、実質的には式 (7) の右辺第 2 項を定数とみなして Raoult の法則をコンポストに適用できることが明らかとなった。

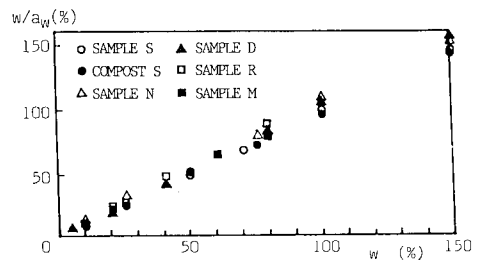


Fig. 4 Relations between w and w/a_w .

そこで、以後、式 (7) に代わって、右辺第 2 項を定数 K として扱った次式を用いて含水比と水活性との関係付けを行うことにする。

Table 2 Value of K.

Sample	K (%)	Sample	K (%)
SAMPLE S	2.0	SAMPLE M	4.0
SAMPLE N	3.6	SAMPLE R	5.0
SAMPLE D	4.1	COMPOST S	2.2

$$w/a_w = w + K \dots\dots\dots (8)$$

または、

$$a_w = \frac{w}{w + K} \dots\dots\dots (9)$$

さらに、Fig. 4 に式 (8) をあてはめ、各試料に対する K の値を求めると Table 2 のようになった。

b) 水活性と微生物の活性 水分量と微生物の活性との関係を調べるため、各試料に対し水分量を変えてそれぞれの酸素消費量を測定した。そのときの乾燥試料 1g 当たりの累積酸素消費量の経時変化の一例を Fig. 5 に示す。その結果、水分が少なくなると酸素消費が遅くなることが確認された。

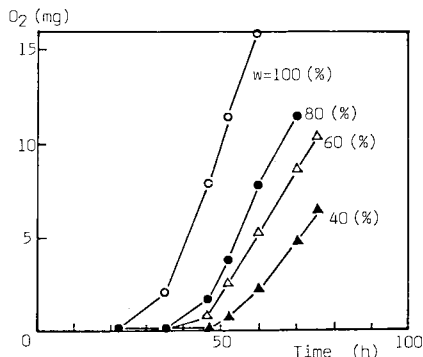


Fig. 5 Time course of oxygen consumption.

そこで、各試料に対して測定した酸素消費量の経時変化から酸素消費速度を求め、酸素消費量の測定を行った

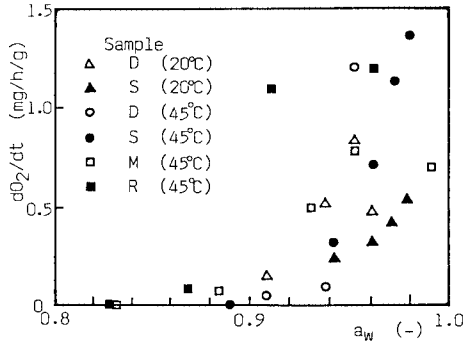


Fig. 6 Effect of water activity on respiration rate.

ときの水活性との関係をグラフ化すると Fig. 6 のようになる。これより、試料のいかにかわらず、水活性が低下するに従って酸素消費速度が遅くなり、水活性が 0.9 より低くなると酸素消費がほとんど起こらなくなることがわかる。

c) 一次発酵過程における水活性の影響 水活性を一次発酵過程における水分管理に利用するに際し、水活性が現実の一次発酵にどのように影響を及ぼすかを検討する必要がある。

著者らは別の論文²⁾において、おがくずとドッグフードの混合物 (SAMPLES) および新聞紙とドッグフードの混合物 (SAMPLE N) を原料として用い、定温条件下で発酵実験を行い、ここで観測される分解率 r が Contois モデル⁷⁾より導出した次式によって表現され得ることを示した。

$$t = -\frac{k Y_x}{\mu_m} \ln(r_u - r) + \frac{1}{\mu_m} \ln r + c \dots \dots \dots (10)$$

ただし、 t は発酵時間、 k は Contois の定数、 Y_x は菌体収率、 μ_m は最大比増殖速度、 r_u は最終分解率、 c は定数である。

そこで、この 2 種類の試料に対して、発酵実験より算出した最大比増殖速度と水活性との関係について調べる

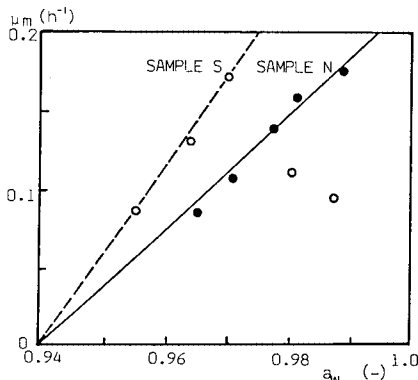


Fig. 7 Relations between a_w and μ_m .

と Fig. 7 のようになる。これによると、少なくとも水分の少ない領域において両者の間に直線関係が成り立つことがわかる。また、この直線上において $\mu_m=0$ となる時の水活性の値が両試料で一致しており、 $a_w > 0.94$ の領域において次の関係が成り立っている。

$$\mu_m = \mu_a (a_w - a_{w0}) \dots \dots \dots (11)$$

ただし、 μ_a は定数、 a_{w0} は $\mu_m=0$ となる時の水活性である。なお、 $a_w=0.94$ に相当する SAMPLE S および SAMPLE N の含水率はそれぞれ 24 % および 36 % である。

以上のことから、水活性は堆肥化に必要な水分の下限を示す汎用性のある指標と考えることができる。また、一般に細菌が増殖するには $a_w > 0.95$ が必要とされている^{2), 8)}が、Fig. 7 はこの考えを堆肥化過程にも適用できることを示している。

次に、式 (11) に式 (9) を適用し、含水比と最大比増殖速度との関係式に直すと次のようになる。

$$\mu_m = \mu_w \frac{w - w_0}{w + K} \dots \dots \dots (12)$$

ただし、 $\mu_w = \mu_a K / (w_0 + K)$ 、 w_0 は $a_w = a_{w0}$ のときの含水比である。

さらに、含水率 M_c と最大比増殖速度との関係式は以下のようなになる。

$$\mu_m = \mu_w \frac{M_c - M_{c0}}{M_c + K'} \dots \dots \dots (13)$$

ただし、 $\mu_w = 10\,000 \mu / (100 - m_{c0}) / (100 - K)$ 、 $K' = 100 K / (100 - K)$ 、 M_{c0} は $a_w = a_{w0}$ のときの含水率である。

したがって、最大比増殖速度に対する水分の影響を含水比や含水率の関数として表現すると、限界値をもった Monod 型関数となることがわかる。

3. 堆肥化可能な水分の上限

水活性から考えると、水分が多いほど微生物の活動には有利ということになるが、好気反応を利用した堆肥化過程においては水分が多くなると空隙が減少し、酸素が十分に供給されなくなるため反応阻害を起こす。著者らは、堆肥化が可能な水分の上限が原料によって異なること²⁾ならびに、水分増加に伴いコンポストの比表面積が低下することを確認した⁹⁾。しかし、原料が圧密を受けた場合の堆肥化可能な水分の上限を決めることはできなかった。

そこで、以下では、水分増加に伴う自重増加によって生ずる気道の閉塞と水分の上限との関係について検討を加えることとした。

(1) 実験方法

Fig. 8 に実験装置を示す。あらかじめ水分を調整した試料をカラムに充填し、下部より所定流量の通気を行い、

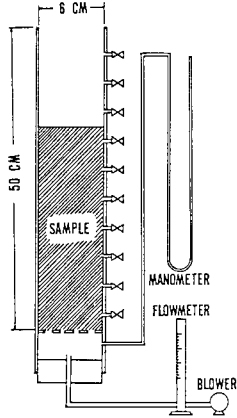


Fig. 8 Apparatus for air flow tests.

このときに要する送気圧（水頭差 ΔH ）を測定した。また、試料の充填状態の再現性を高めるため、高さ 5 cm からの落下による突き固め回数 N を統一した。

なお、試料の充填厚は 30 cm、通気量は 3.0 l/min とした。

(2) 結果と考察

a) 水分量と気道の閉塞 試料の水分量を増やしていくと送気圧は一般に次のように変化する。すなわち、初めは、自重の増加に伴って充填密度が大きくなるため送気圧が増加する。しかし、水分がある値以上になると試料が粒団を形成し、見掛け上の比表面積が減少するため、送気圧は減少する。さらに水分が増えると、自重によって粒団が押しつぶされ、気道が閉塞するため、再び送気圧が増加する。この現象は Fig. 9 および Fig. 10 から読み取ることができる。

また、堆肥化反応における分解の良否は最終分解率 r_u に反映され、これが大きいほど分解が進んだことを示す。そこで、著者らが実験²⁾によって求めた r_u と水分量との関係についても Fig. 9 および Fig. 10 に併記した。

試料別にみると、SAMPLE S の場合、含水比が 175 %（含水率 64 %）を超えると送気圧が減少から増加に転じ、気道の閉塞が起こることがわかる。また、含水率を 65 % にすると r_u が小さくなり、十分な分解が行われなくなることを示している。このことから、水分の上限が気道の閉塞を起こす水分量とほぼ一致するといえる。

一方、SAMPLE N の場合、気道の閉塞は含水比が 275 %（含水率 73 %）を超えると起こる。また、含水率が 75 % になると r_u が低下し、十分な分解が行われにくくなりつつあるとみなすことができる。

このように、堆肥化反応を進行させることのできる水分の上限が、気道の閉塞を考慮することで決定されることが明らかとなった。

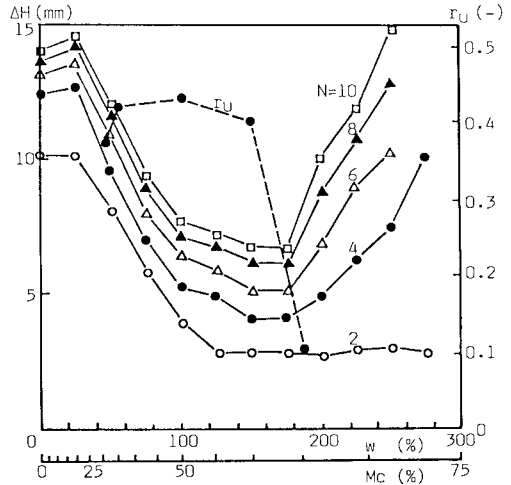


Fig. 9 Effects of moisture on ΔH and r_u (SAMPLE S).

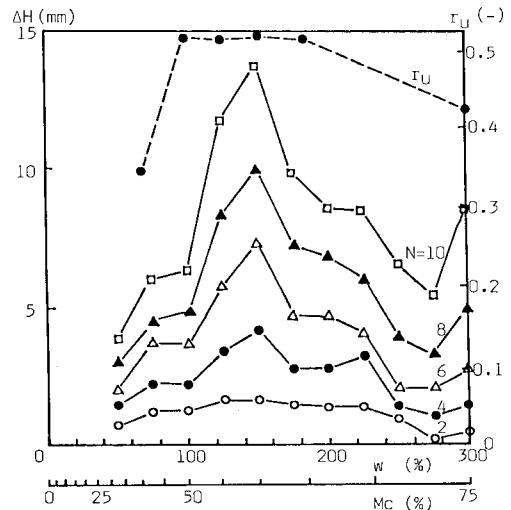
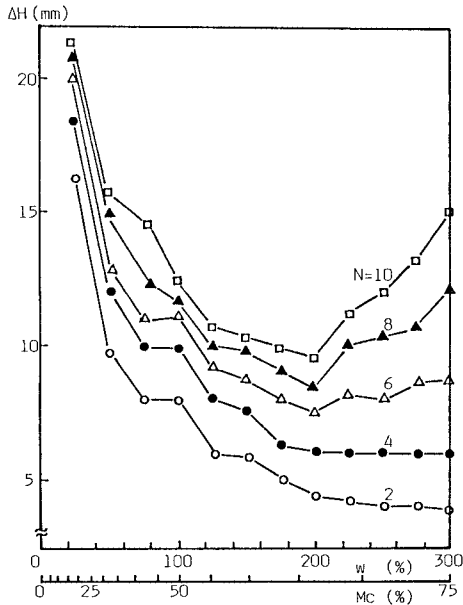
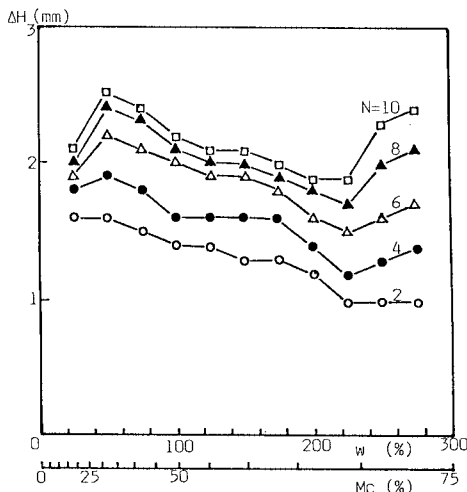


Fig. 10 Effects of moisture on ΔH and r_u (SAMPLE N).

b) 粒径との関係 同じ物質であっても粒径が異なれば、閉塞を起こし始める水分量が変わると推察される。そこで、1.41 mm 以下にふるい分けしたおがくず (SAMPLE F) と 1.41 mm ~ 2.0 mm の粒径をもつおがくず (SAMPLE C) に対して、それぞれ突き固め回数 N を変えて水分量と送気圧との関係を調べた。

その結果を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。両者を比較すると、粒径が大きいものほど比表面積が小さいことから、SAMPLE C の方が SAMPLE F に比べてかなり送気圧が小さいことがわかる。また、粒径の大きいものの方が水分量変化に伴う送気圧の変化が小さく、水分による粒団形成が行われにくいことを示している。

気道が閉塞し始める水分量をみると、SAMPLE C の場合は含水比 225 % であるのに対し、SAMPLE F

Fig. 11 Effects of moisture on ΔH (SAMPLE F).Fig. 12 Effects of moisture on ΔH (SAMPLE C).

の場合には含水比 200% となっており、粒径が小さいものほど閉塞を起こし始める水分量が小さいことがわかる。

したがって、比表面積を増やして反応速度を高める目的で粒径を小さくしすぎると、気道の閉塞が起きやすくなり、かえって発酵にマイナス効果を与えることがあるといえ。また、下水汚泥のように、粒径が小さく、水分を多く含むため、閉塞を起こしやすい物質の通気性を改善するために添加する bulking agents としては、ある程度の粒径をもつ物質を用いるべきである。

4. 結 論

コンポストの一次発酵を適正かつ迅速に行うためには水分を管理する必要がある。しかし、堆肥化が可能な水分量の下限および上限が明確でないばかりでなく、従来のように含水率や含水比を水分の指標として用いた場合原料によってその値が異なるという問題があり、必ずしも効果的な水分管理が行われているとはいえない。そこで本研究では、汎用性のある指標の導入ならびに堆肥化反応に必要な水分量の下限および上限の検討を行った。

まず、水分量の下限を示す指標として水活性を導入し含水比との関係について調べた結果、次のことが明らかとなった。

(1) コンポストの水活性 a_w と含水比 w との間には次の関係が成り立つ。

$$a_w = \frac{w}{w+K}$$

また、微生物の活性の指標として酸素消費速度を用い、これと水分量との関係について調べ、次のことを確認した。

(2) 水分量が減るとコンポストの酸素消費速度が低下し、試料の種類によらず水活性が 0.9 より小さくなると酸素消費は起こらなくなる。

さらに、著者らが求めた最大比増殖速度²⁾と水活性との関係を調べたところ、次のことが明らかとなった。

(3) 水分の少ない領域において、最大比増殖速度と水活性との間に直線関係が成り立つ。

(4) 含水率を指標とすると水分の下限値の異なる 2 種の試料に対し、水活性を指標として同一の下限値が得られた。

(5) 水活性は機器測定が容易で連続測定も可能なため、堆肥化過程における水分管理にとって非常に有用な指標となり得る。

次に、堆肥化が可能な水分量の上限について検討するため、水分量と気道の閉塞との関係について調べた。その結果、以下のことがわかった。

(6) 気道の閉塞は、ある水分量を境にして起こり、この限界値は、反応を正常に進めることができる水分量の上限とほぼ一致する。

(7) 同種の試料においては、粒径の小さいものほど閉塞を起こす水分量の限界値が小さい。したがって、水分調整のために添加する bulking agents としてはある程度の粒径をもつ物質を用いるべきである。

また、今後は、水活性による水分管理を取り入れて発酵実験を行い水活性の有用性をさらに確認するとともに、攪拌等の操作が水分の上限に及ぼす影響について検

討する必要がある。

使用記号

a_w : 水活性 [-]
 a_{w0} : $\mu_m=0$ となるときの水活性 [-]
 c : 分解率の経時変化に係る定数 [h]
 K : 定数 ($\equiv \kappa M_w / M_s$) [%]
 $K' = 100 K / (100 - K)$ [%]
 k : Contois の定数 [-]
 M_c : 含水率 [%]
 M_{c0} : $a_w = a_{w0}$ のときの含水率 [%]
 M_s : 水相に溶解している物質の平均分子量 [-]
 M_w : 水の分子量 [-]
 m_s : 水相に溶解している物質質量 [kg]
 N : 突き固め回数 [回]
 n_1 : 溶質のモル数 [mol]
 n_2 : 溶媒のモル数 [mol]
 O_2 : 累積酸素消費量 [kg]
 p : 水溶液の飽和蒸気圧 [atm]
 p_0 : 水の飽和蒸気圧 [atm]
 r : 分解率 [-]
 r_u : 最終分解率 [-]
 t : 時間 [h]
 W : コンポスト中の水量 [kg]
 w : 含水比 [%]
 w_0 : $a_w = a_{w0}$ のときの含水比 [%]
 X : 菌体量 [kg]
 Y_0 : 酸素消費に関する定数 [kgO₂/kgcell]
 Y_x : 菌体収率 [kgcell/kgsubstrates]
 κ : 水相に溶解している物質の乾燥質量に対す

る割合 [%]

μ_a : 最大比増殖速度に関する係数 [1/h]
 $\mu_u = 10000 \mu / (100 - m_{c0}) / (100 - K)$ [1/h]
 μ_m : 最大比増殖速度 [1/h]
 $\mu_w = \mu_a K / (w_0 + K)$ [1/h]

参考文献

- 1) 金子栄廣・藤田賢二：コンポスト化反応のパターン解析と含水率の影響，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp.33~34，1982.
- 2) 金子栄廣・藤田賢二：堆肥化反応における水分の影響，衛生工学研究論文集，Vol.21，pp.115~121，1985.
- 3) Troller, J. A. : Effect of water activity on enterotoxin A production and growth of *Staphylococcus aureus*, Appl. Microbiol., Vol.24, No.3, pp.440~443, 1972.
- 4) Lotter, L. P. and Leistner, L. : Minimal water activity for enterotoxin A production and growth of *Staphylococcus aureus*, Appl. and Environ. Microbiol., Vol.36, No.2, pp.377~380, 1978.
- 5) Scott, W. J. : Water relations of food spoilage microorganisms, Adv. Food Res., Vol.7, pp.83~127, 1957.
- 6) 化学ハンドブック編纂委員会編：化学ハンドブック，p.442，1978.
- 7) Contois, D. E. : Kinetics of bacterial growth : Relationship between population density and specific growth rate of continuous cultures, J. Gen. Microbiol., Vol.21, pp.40~50, 1959.
- 8) Griffin, D. M. : Soil moisture and ecology of soil fungi, Bacteriol. Rev., 38, p.141, 1963.
- 9) 金子栄廣・藤田賢二：コンポストの水分量と比表面積の関係，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp.965~966，1984.

(1985.7.15・受付)