

(11) 堆肥化反応における水分の影響

EFFECT OF MOISTURE ON DECOMPOSITION RATE IN COMPOSTING

金子 栄廣*・藤田 賢二*

Hidehiro KANEKO*, Kenji FUJITA*

ABSTRACT; Moisture control is required for optimum composting. In this paper, the effect of moisture was examined by measuring decomposition ratio which is dimensionless loss of mass. In benchi-scale composting, temperature was controlled constant at 50°C with the mixture of newsprint and dog food (sample N) or the mixture of sawdust and dog food (sample S). For each run, moisture content was set differently and maintained constant throughout. To make kinetic consideration, Contois' model is used for expressing the time course of decomposition ratio. Since other experiments confirm that it is suitable for composting compared to Monod's model. Fitting of this model, the experimental results show that optimum moisture content is 50 to 60% for both samples, and the ratio of Contois' constant to maximum specific growth rate (k/μ_m) is the adequate index for expressing the decomposition rate.

KEYWORDS; COMPOST, MOISTURE, KINETICS

1. はじめに

コンポストの一次発酵過程において反応に影響を及ぼすと考えられる環境因子には、発酵温度、水分、酸素濃度、pH等があり、これらが相互に影響しあって堆肥化が進む。そして、これらの環境因子を適当に制御することによって一次発酵を効率よく行わせることができる。このことは、製品コンポストの品質管理を行う上で重要なばかりでなく、発酵装置の小型化を進める上でも大いに意義がある。しかし現在のところ、各因子をどのように制御すべきかということが明確にされていない。そこで本研究では、一次発酵過程を動力学的に考察すると同時に、制御が比較的容易と思われる水分に焦点を当て、水分が堆肥化反応速度にどのように影響するかを調べることにした。

2. 反応モデル

2.1 基礎式

コンポストの固形分は、反応中に分解される基質、増殖する菌体、生成される代謝産物および微生物による分解を受けない非反応性物質から成る、すなわち、次式の関係が成立つと考える。

$$D = S + X + P + N \quad \dots\dots (1)$$

ただし、 D :乾燥質量[kg] S :基質量[kg] X :菌体量[kg]
 P :代謝産物量[kg] N :非反応性物質質量[kg] である。

また、基質、菌体および代謝産物の間には、次の関係が成立ち、各収率は時間に関し不変であるとする。

* 東京大学

Univ. of Tokyo

$$dX/dt = -Y_x \cdot dS/dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 Y_x : 菌体収率 [kg/kg] である。

$$dP/dt = -Y_p \cdot dS/dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 Y_p : 代謝産物収率 [kg/kg] である。

ここで、(1)式を時間で微分し、(2)および(3)式を代入すると、

$$dD/dt = (1 - Y_x - Y_p) \cdot dS/dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。さらに、原料の乾燥質量を D_0 [kg]、基質量を S_0 [kg]、また反応終了時には基質は総て消費され、乾燥質量が D_u [kg] に達するとして(4)式を積分すると次式が得られる。

$$S = a (D - D_u) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$a = S_0 / (D_0 - D_u)$$

また、分解率 r [-] を次のように定義する。

$$r = 1 - D/D_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

2.2 Monod モデル

反応モデルとして、まず水中での菌体増殖モデルとして広く使われている次の Monod モデルを考える。この場合、菌体濃度や基質濃度の表わし方に様々な考え方があるが、ここでは基質および菌体の濃度を乾燥質量ベースで考え、また、基質以外は、律速にならないものとする。

$$dX/dt = \mu_{ms} X / (K_s + s) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 μ_m : 最大比増殖速度 [1/h] K_s : 飽和定数 [kg/kg]

s : 基質濃度 [kg/kg] ($= S/D$) である。

ところで、コンポストにおいて基質および菌体を直接測定することは困難であるから、以下の方法によりこれらを測定可能な量に変換する。まず、(2)式を積分すると、

$$X = -Y_x (S - S_0) + X_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 X_0 : 初期菌体量 [kg] である。

となる。ここで初期菌体量 X_0 が十分に小さいとみなし、(2)および(8)式を(7)式に代入し、菌体量を基質量に置き換えると、次式が得られる。

$$dS/dt = \mu_m S (S - S_0) / (K_s D + S) \quad \dots\dots\dots (9)$$

さらに、(5)および(6)式を用いて分解率の関数に変換すると、分解速度は次のように表現される。

$$dr/dt = \mu_m a r (r_u - r) / \{ K_s (1 - r) + a (r_u - r) \} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 r_u : 最終分解率 [-] である。

また、これを積分すると、次式のように分解率と時間との関係が得られる。

$$t = -A_M \ln(r_u - r) + B_M \ln r + C_M \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$A_M = K_s (1 - r_u) / a \mu_m r_u \quad [h]$$

$$B_M = 1 / \mu_m + K_s / a \mu_m r_u \quad [h]$$

ただし、 C_M : 積分定数 [h] である。

2.3 Contois モデル²⁾

コンポストのように水相の小さな系では、物質が高濃度で存在するため、それらが律速となることが十分に考えられる。しかし、Monod モデルでは、この点に関する考慮が欠けている。これに対し Contois は、Monod モデル中の飽和定数 K_s が菌体濃度の関数となることを実験的に確かめ、Monod モデルに菌体濃度の影響を組み込んだ形のモデルを提唱している。そこで、この Contois モデルも検討する。Monod モデルの場合と同様、基質および菌体の濃度を乾燥質量ベースでとらえると、Contois モデルは次式で表現される。

$$dX/dt = \mu_m s X / (Kx + s) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 K : 定数 [-] x : 菌体濃度 [kg/kg] ($= X/D$) である。

これも、上記と同様にして分解率の関数に書換えると、次のようになる。

$$dr/dt = \mu_m r (r - r_u) / \{ (1 - KY_x) r - r_u \} \quad \dots\dots (13)$$

または、

$$t = -Ac \ln(r_u - r) + Bc \ln r + Cc \quad \dots\dots (14)$$

$$Ac = KY_x / \mu_m \quad [h]$$

$$Bc = 1 / \mu_m \quad [h]$$

ただし、 Cc : 積分定数 $[h]$ である。

2.4 モデルの検証

(11)式および(14)式に示すように、MonodモデルとContoisモデルとを分解率を用いて表わすと、同じ形になる。しかし、各係数の意味が異なるので、実際にデータへのあてはめを行う前に、どちらが一次発酵過程を表現するのに適しているかを判断しなければならない。そこで、発酵実験に先立ち、以下の方法によりモデルの検証を行う。

反応開始直後における菌体量および基質量はそれぞれ次式により表現できる。

$$X = b_x B \quad \dots\dots (15)$$

ただし、 b_x : 種コンボストの菌体濃度 $[kg/kg]$

B : 種コンボスト量 $[kg]$ である。

$$S = b_s B + c_s C \quad \dots\dots (16)$$

ただし、 b_s : 種コンボストの基質濃度 $[kg/kg]$

c_s : 原料の基質濃度 $[kg/kg]$ C : 原料量 $[kg]$ である。

ところで、好気性発酵において酸素消費速度が菌体増殖速度に比例するとみなせば、次式の関係が得られる。⁹⁾

$$dO_2/dt = Y_o \cdot dX/dt \quad \dots\dots (17)$$

ただし、 O_2 : 累積酸素消費量 $[kg]$ Y_o : 比例定数 $[kg/kg]$ である。

したがって、(15)・(16)および(17)式を用いると、(7)式および(12)式はそれぞれ次のように書換えられる。

$$dO_2/dt = \mu_m b_x Y_o (b_s B + c_s C) B / \{ k_s (B+C) + b_s B + c_s C \} \quad \dots\dots (18)$$

$$dO_2/dt = \mu_m b_x Y_o (b_s B + c_s C) B / (k b_x B + b_s B + c_s C) \quad \dots\dots (19)$$

ここで、原料の代りに基質を含まない物質と用いると $c_s = 0$ となるので、上の二式はそれぞれ次のように変形できる。

$$B / (dO_2/dt) = \alpha_M \cdot C / B + \beta_M \quad \dots\dots (20)$$

$$\alpha_M = k_s / \mu_m b_x b_s Y_o \quad [kg \cdot h / kgO_2]$$

$$\beta_M = (k_s + b_s) / \mu_m b_x b_s Y_o \quad [kg \cdot h / kgO_2]$$

$$B / (dO_2/dt) = \beta_C \quad \dots\dots (21)$$

$$\beta_C = (k b_x + b_s) / \mu_m b_x b_s Y_o \quad [kg \cdot h / kgO_2]$$

したがって、 C/B を横軸に、 $B/(dO_2/dt)$ を縦軸にとりデータをプロットすれば、どちらのモデルが適切であるか判断できる。すなわち、Monodモデルが成立つならば(20)式が成立ち、正の傾きを持つ直線関係が得られ、Contoisモデルが成立つならば(21)式が成立ち、 $B/(dO_2/dt)$ は C/B によらず一定となる。

3. 実験および実験結果

3.1 モデル検証実験の方法と結果

ここで用いた実験装置をFig. 1に示す。ビンの中に C/B および水分を調整した試料を入れる。このとき、呼吸により酸素が消費され二酸化

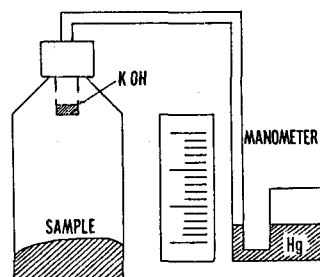


Fig. 1 RESPIRATION APPARATUS

化炭素が発生すると、ビン内のアルカリに吸収され、圧力が減少する。この圧力減少を測定することにより酸素消費速度を求めることができる。なお、種コンポストとしては、おがくずとドッグフードを1:1に混合し、市販の発酵促進材で植種後、3日間培養したものを用いた。また、水分調整後の保水状態がC/Bによらないようにするため、易分解性基質を含まない物質としては、物理的性状が種コンポストに似ていると思われるおがくずを用いた。

次に、実験結果をFig. 2に示す。これによると、 $B/(do_2/dt)$ がC/Bによらず一定となっている。したがって、コンポストの一次発酵過程を表現するにはContoisモデルが適当と考えられる。

3.2 発酵実験

(A) 実験方法

発酵実験に用いた装置をFig. 3に示す。はじめに述べたように、一次発酵過程に影響を及ぼす環境因子は数多いが、中でも温度の影響が最も大きく、特に、実験室規模の発酵槽では外気温の影響を受け易い。そこで温度の影響を小さくするため、発酵槽を恒温槽に入れ、さらに、温度制御装置により発酵槽内の温度を一定に保つように努めた。また、送気によるコンポストの乾燥を防ぐため、発酵槽の手前に加湿器を設けた。

ここで用いた原料とその量を次に示す。

試料N： 新聞紙+ドッグフード

(乾質比1:1 合計1.5 kg)

試料S： おがくず+ドッグフード

(乾質比1:2 合計2.2 kg)

原料の均一性を高めるために、新聞紙は5 mm以下、おがくずおよびドッグフードは2 mm以下に粉碎したものを用いた。また、植種のため、市販の発酵促進材を原料の乾燥質量の1%加えた。なお、C/Nは両試料共約20である。

次に、実験条件について述べる。発酵はバッチ式で、切返しはサンプリング時に手動で行った。含水率は各RUN毎に設定し、

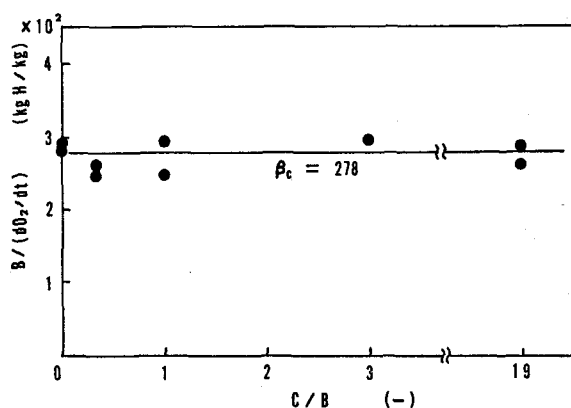


Fig. 2 CHECK OF MODEL

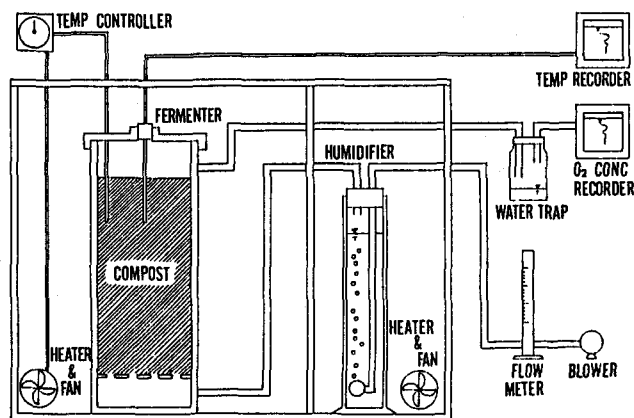


Fig. 3 FERMENTER & EXPERIMENTAL EQUIPMENT

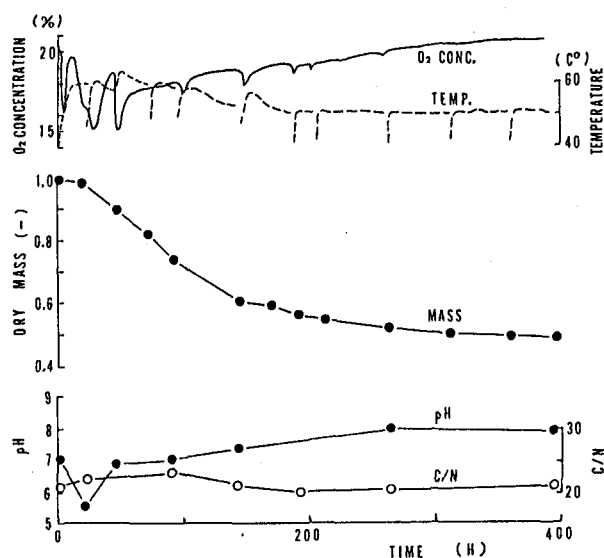


Fig. 4 EXPERIMENTAL RESULTS (SAMPLE N M.C.=60%)

RUNを通して一定になるように適宜調整した。送気量は、酸素濃度が律速になるのを防ぐため3.0 [1/min]と多めに設定した。また、発酵槽内温度は50℃に設定した。

測定項目は、サンプリング前後の湿質量、含水率、浸出液pH、排気中の酸素濃度および発酵槽内温度である。(浸出液とは、湿コンポストと水とを質量比1:9に混合し、30分間攪拌した液のことをいう。)

(B) 実験結果

各測定項目の経時変化の一例をFig. 4に示す。各RUN共、反応開始後100時間～150時間までに激しい質量減少がみられた。またこの期間において、発酵槽内温度は設定値を超え、排気中の酸素濃度も14～15%まで低下した。浸出液pHは、初めの20～30時間で低い値を示したが、その後上昇し8～9で安定した。ただし、試料Sで含水率を65%以上に設定した場合には、pHが下がったまま回復せず、反応も停止してしまった。また、いくつかのRUNについてC/Nを測定したところ、いずれも20付近で安定していた。

4. 考 察

4.1 モデルのあてはめ

最小二乗法により(14)式の実験データへのあてはめを行う。ここでは、係数Ac、BcおよびCcの推定が主目的であるが、式中に変数ruが存在するため、ruの推定も同時に行わなくてはならない。そこでFig. 5のフローに示すように、実験値と(13)式の偏差平方和を考慮に入れて計算を行った。

次に、あてはめの一例をFig. 6およびFig. 7に示す。この結果、(14)式により反応が正常に進んだRUN(試料N:含水率50～77%、試料S:含水率30～60%)の分解率の変化をよく表現できることが明らかになった(相関比>0.97)。

4.2 水分量と係数

各RUNに対しあてはめを行った結果をTable.1およびFig.8～

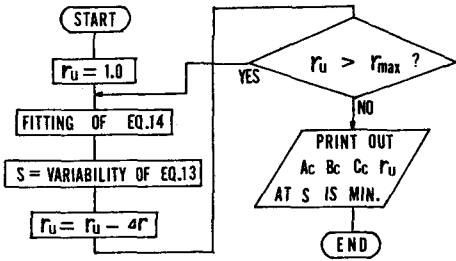


Fig. 5 FLOW OF FITTING

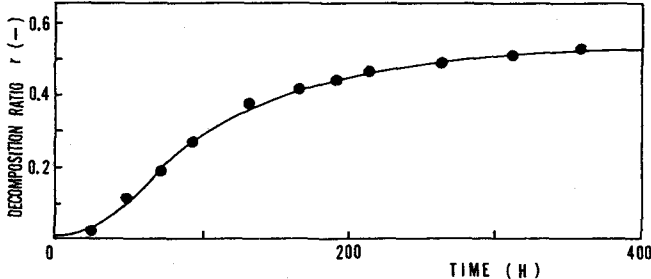


Fig. 6 FITTING OF EQ.14 (SAMPLE N MC=60%)

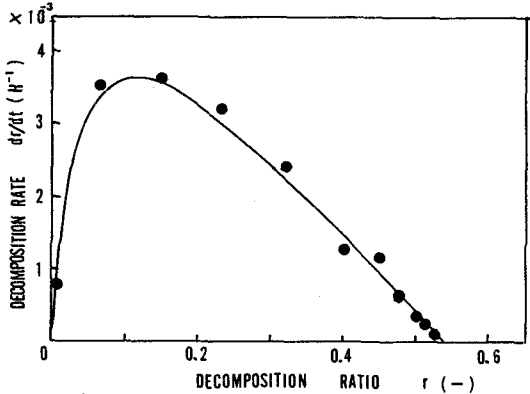


Fig.7 FITTING OF EQ.13 (SAMPLE N MC=60%)

Table 1 Fitting for each experimental RUN

Sample	M.C.[%]	Ac[h]	Bc[h]	Cc[h]	ru[-]	η ^{a)} [-]
Sample N	40	—	—	—	0.305 ^{b)}	—
Sample N	50	144	11.7	- 2.17	0.531	0.977
Sample N	55	77.3	9.44	- 1.23	0.519	0.998
Sample N	60	85.9	7.18	- 6.55	0.532	0.999
Sample N	65	80.1	6.42	-21.3	0.507	0.997
Sample N	77	82.4	5.80	-22.5	0.421	0.995
Sample S	30	154	11.9	-60.7	0.373	0.997
Sample S	35	153	7.83	-74.4	0.422	0.997
Sample S	40	110	5.95	-47.2	0.420	0.998
Sample S	50	80.5	8.54	-23.4	0.431	0.996
Sample S	60	47.2	10.8	18.0	0.408	0.984
Sample S	65	—	—	—	0.104 ^{b)}	—

a) correlation ratio
b) experimental data

Fig.11に示す。最終分解率 r_u は試料Nの場合、含水率50～60%のRUNにおいて0.51～0.53、試料Sの場合、含水率35～60%のRUNにおいて0.41～0.43となり、同種の原料に対してほぼ同じ値を示した。しかし、含水率がこの範囲を超えた場合 r_u は小さな値であった。また、反応速度も含水率により影響され、両試料共、含水率55～60%において反応速度が最大となった。このことから、水分を適当に保つことは反応速度を高めると同時に、充分な分解を行わせる上でも重要であるといえよう。

次に、含水率毎の係数 A_c 、 μ_m および kY_x をFig.12およびFig.13に示す。これによると、反応速度の大きいものほ

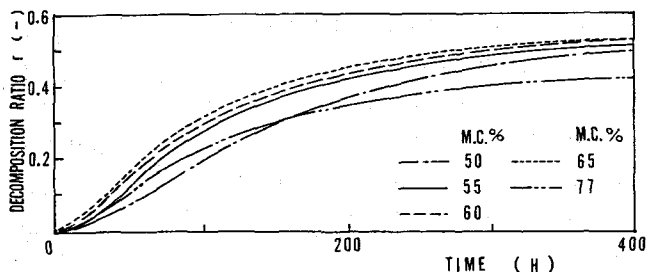


Fig. 8 EFFECT OF MOISTURE (SAMPLE N EQ. 14)

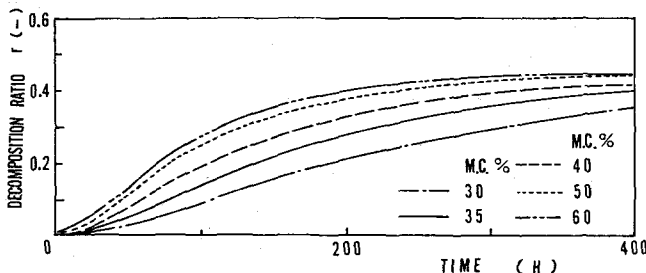


Fig. 9 EFFECT OF MOISTURE (SAMPLE S EQ. 14)

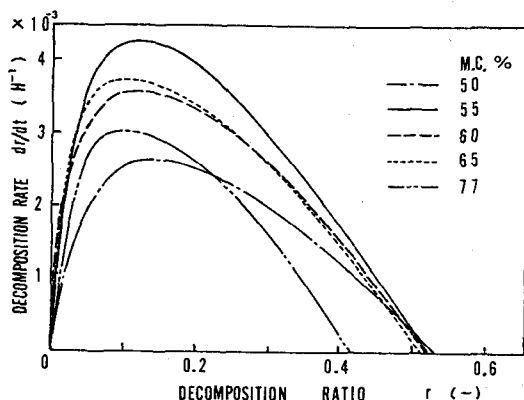


Fig. 10 EFFECT OF MOISTURE (SAMPLE N EQ. 13)

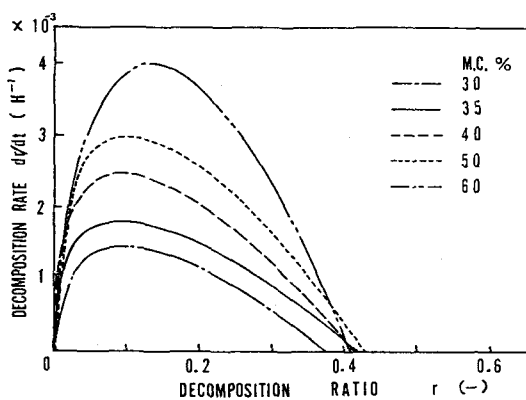


Fig. 11 EFFECT OF MOISTURE (SAMPLE S EQ. 13)

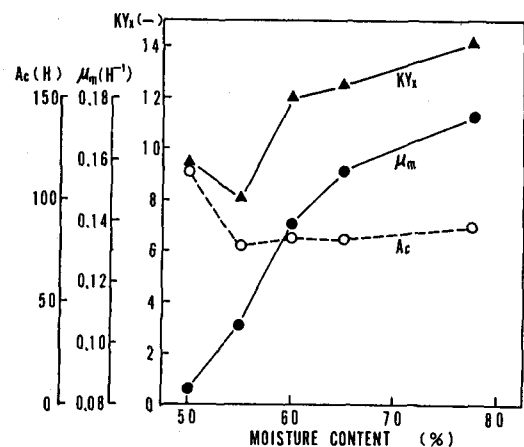


Fig. 12 COEFFICIENTS FOR SAMPLE N

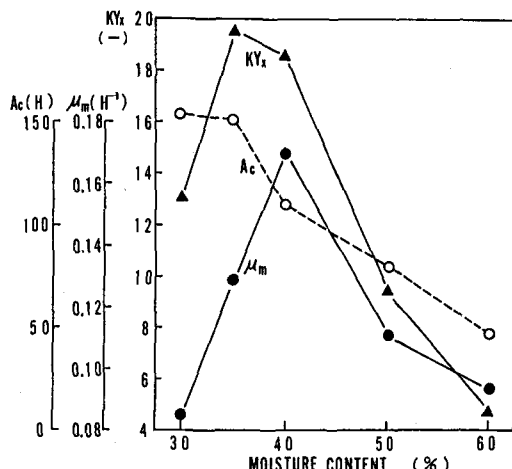


Fig. 13 COEFFICIENTS FOR SAMPLE S

ど A_c が小さい。一方 μ_m は、試料 N の場合、反応速度が最大となる含水率 55% を超えても増大している。また、試料 S の場合は、含水率 60% で反応速度が最大になるにも拘らず、含水率が 40% 以上になると μ_m は減少する。このことから、反応速度の遅速を μ_m だけで判断することはできないと考えられる。

4.3 反応速度と係数

以上の考察から、 μ_m より A_c 、すなわち kY_x と μ_m との比の方が反応速度の遅速をよく反映するものと推察される。そこで、係数の反応速度に対する影響について検討する。

まず、 μ_m を一定にし、 A_c を変化させたときの分解率の経時変化を Fig. 14 に示す。これより、 A_c が小さいほど反応が速いことが明らかである。

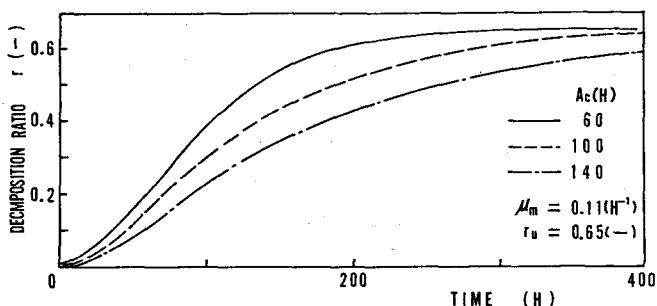


Fig. 14 EFFECT OF A_c

次に A_c を一定にし、 μ_m を変えたときの分解率の経時変化を Fig. 15 に示す。これによると、 μ_m が大きいほど反応が速いことがわかる。しかし、 μ_m の反応速度に対する影響は A_c のそれに比べて小さいといえる。

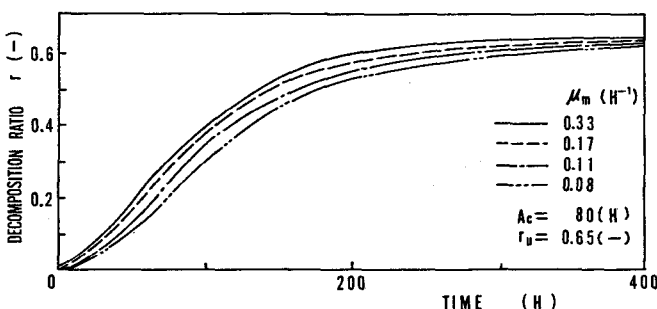


Fig. 15 EFFECT OF μ_m

したがって、コンポストの一次発酵期における反応速度を評価する上で、係数 A_c が重要な意味を持つと考えられる。

5. 結 論

以上の実験および考察より次のことが明らかになった。

- 1) 濃度を乾燥質量ベースで表わした場合、定温条件下におけるコンポストの一次発酵過程を、Contois モデルによって表現することができる。
- 2) 試料 N (新聞紙+ドッグフード) および試料 S (おがくず+ドッグフード) において、含水率 50 ~ 60% で反応速度が最大となる。
- 3) 十分な分解を行わせるには、試料 N の場合は含水率 50 ~ 65%、試料 S の場合は含水率 35 ~ 60% に制御するのが望ましい。
- 4) 反応速度の遅速は係数 $A_c (=kY_x/\mu_m)$ によって判断することができ、 A_c の小さい方が反応が速い。

<参考文献>

- 1) 金子・藤田：土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集，1982.
- 2) Contois, D.E., J.Gen.Microbiol., 21, 40-50, 1959.
- 3) 山根恒夫：生物反応工学，産業図書，P. 146~148, 1980.