

# 土壌中の生物活性と温度

金野 隆 光\*

Temperature Effect on the Biological Activity of Soil

Takamitsu KONNO

Tohoku National Agricultural Experiment Station

## 1 は し が き

農家の圃場で起こる諸現象は多様な因子が絡んでいて複雑である。因子間の相互関係を正しく把握して主要な要因を抽出するには長い年月を要し、とかく経験的な科学になりがちである。筆者は自然界の複雑なよりを解きほぐす糸口を見出したいと考え、なるべくこれらの因子の量的関係の把握に努めている。そのために土壌中の生物活性に最も影響を与える温度に着目して量的関係を検討し、若干の実用的手法を考案した。また、反応速度論的手法も有効と考えられるので、合わせて紹介し、討論の材料とした。

## 2 種子発芽速度と地温<sup>1)</sup>

生物活性と温度との関係を検討するきっかけとなった試験例から紹介したい。図-1は北海道農試畑作部の玉田業務科長が調べられた試験成績である。高さ16mの落葉松(防風林)の西側に影ができ、それが小豆の生育・収量にどの程度の影響を及ぼすかが調べられた。高さ16mの落葉松の西側16mまでは午前8時まで影となり、8

mまでは午前9時まで影となる。その結果、影の部分の小豆の生育・収量は悪くなり、落葉松の高さと同じ16mまで影響を及ぼし、特に高さの半分の8m位までは強く影響することがわかった。

この時の発芽日数と地温との関係を調べ表-1に示した。地温は落葉松から遠いほど高く発芽日数は17日だったのに対し、落葉松から5.7mの地点では1.6℃低く、発芽日数は23.5日で、発芽が1週間おくれた。

ここで注意を要することは、発芽が1週間おくれることは農業にとって大きな問題であり、そのような重大問題が地温のわずかに1.6℃の低下で起るという事である。

次に、発芽日数と地温差との関係を数式で表わすことを試みた。表-1にその計算式及び計算値を示した。深さ5cmの地温データはばらつきが多く、計算値と実測値はあまりよく合わないが、10cmの地温から計算した発芽日数は実測値とよく合った。

ところで、上記の計算式に理論的な意味づけができるであろうか?。更に、計算式の中に0.23という係数があるが、その理論的意味は何か?。という問題が生ずる。そこで、この問題について検討を加えた。

まず種子発芽における生長曲線を想定しなければならない。図-2に示したように発芽における生長曲線は時間tに対して一次式で表わされると仮定する。そうすると生長量は(1)式で表わされる。

$$W = W_0 (1 + kt) \quad (1)$$

温度 $T_1$ 、 $T_2$ における速度定数をそれぞれ $k_1$ 、 $k_2$ とすると(2)式が得られる。(ただし $T_2 - T_1 = \Delta T > 0$ )

$$k_1 G_1 = k_2 G_2 \quad (2)$$

一方、速度定数と温度との間には(3)式(アレニウスの式)が成り立つ。

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad (3)$$

$$\left( \begin{array}{l} E_a : \text{見かけの活性化エネルギー} \\ R : \text{気体定数, } 1.984 \text{ cal/deg} \\ A : \text{定数} \end{array} \right)$$

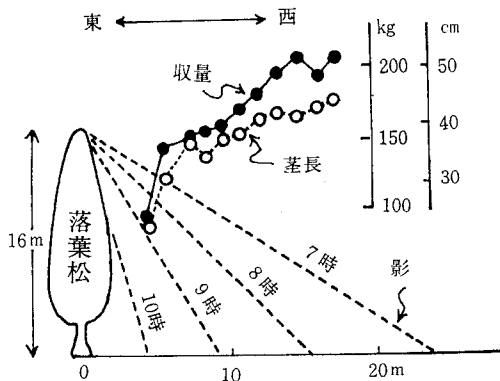


図-1 小豆の生育・収量に及ぼす落葉松の影響(1974)

表一 1 小豆の発芽に及ぼす落葉松の影響 (49年)

項目		地点							
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
落葉松からの距離 (m)		5.7	8.3	10.9	14.8	20.0	25.2	30.4	34.3
発芽期 (月・日)		6.16 ~17	6.13		6.12	6.11	6.10		
発芽日数	実測値	23.5	20		19	18	17日		
	計算値1	23.3	18.8		20.5	19.8	17		
	計算値2	23.4	20.3		17.6	17.6	17		
地 温	5cm部位	17.62	18.76		18.34	18.52	19.23		
	10cm部位	15.44	16.23		16.91	16.92	17.07		

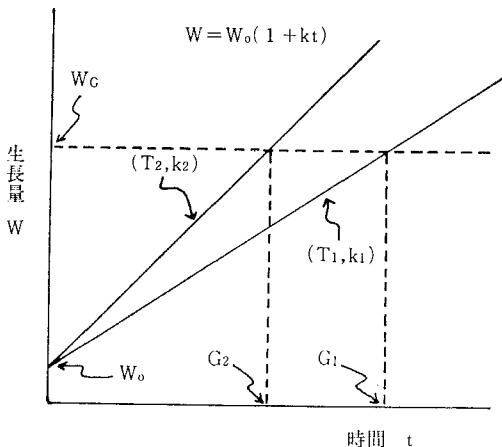
播種期：49年5月24日

地 温：6月10日~16日迄午前と午後2回測定し、その平均値

計算式：発芽日数=17 [1+0.23 (地温差)]

計算値1：5cm部位の地温から計算

計算値2：10cm部位の地温から計算



図一 2 発芽時の生長曲線

- W : 生長量
- W<sub>0</sub> : 種子中の幼根重, 幼芽重
- W<sub>G</sub> : 発芽する迄の生長量
- G : 発芽日数
- k : 速度定数

従ってk<sub>1</sub>とk<sub>2</sub>の比は(4)式で表わされる。

$$k_2/k_1 = \exp(Ea \cdot \Delta T / RT_1 T_2) \quad (4)$$

この式は複雑なので、このままでは実用に向かない。そこでKを(5)式で定義し(単位は [1/deg]), (4)式に代入すると(6)式が得られる。これをテーラー展開して、(8)式の条件を与えるると(9)式のような簡単な式となる。

$$K = Ea / RT_1 T_2 \quad (5)$$

$$k_2/k_1 = \exp(K \cdot \Delta T) \quad (6)$$

$$k_2/k_1 = 1 + (K \cdot \Delta T) + \frac{(K \cdot \Delta T)^2}{2!} + \frac{(K \cdot \Delta T)^3}{3!} + \dots \quad (7)$$

$$1 > (K \cdot \Delta T) > 0 \quad (8)$$

$$k_2/k_1 \approx 1 + K \cdot \Delta T \quad (9)$$

$$k_2/k_1 \approx 1 + (K \cdot \Delta T) + \frac{1}{2} (K \cdot \Delta T)^2 \quad (9')$$

(9)式と(2)式から(10)式が得られる。

$$G_1 = G_2 (1 + K \cdot \Delta T) \quad (10)$$

この式は表一1の計算式と全く同じである。従って、計算式の理論的意味づけと、式中の係数の理論的意味づけとができたことになる。その要点を例挙すると次の通りである。

① 発芽における生長曲線を(1)式の一次式で近似した場合、温度差が小さければ(8)式の条件を与えることができるので、(10)式が適用できる。

② (10)式は発芽日数の比が温度差に比例し、温度係数がKであることを意味し、非常に簡単なので実用に向いている。

③ 農業の実際場面では活性エネルギーとか気体定数のように馴染みのない用語を使うよりは、Kに馴染み易い適切な表現をつける方が役に立つであろう。筆者はKを種子の発芽における生長比温度係数と名付けた。(ただし、Kは(9)式でわかるように、一般的には速度定数比温度係数と呼んだ方がよい)。

④ Kの実用的意味：Kは(5)式で定義され、1より小さい正の数で、作物によって異なり、作物固有の数値であり、温度変化によって受ける影響の強さを表わす数値である。たとえば小豆では0.23で、これを求めておけば地温が平年より1℃高ければ23%早く発芽し、逆に1℃低ければ23%おくれるという計算が容易にできるのである。このようにKは人間の感覚に適した表示法である。

⑤ 発芽における生長比温度係数Kは作物固有の数値なので、従来から用いられている発芽における最低温度

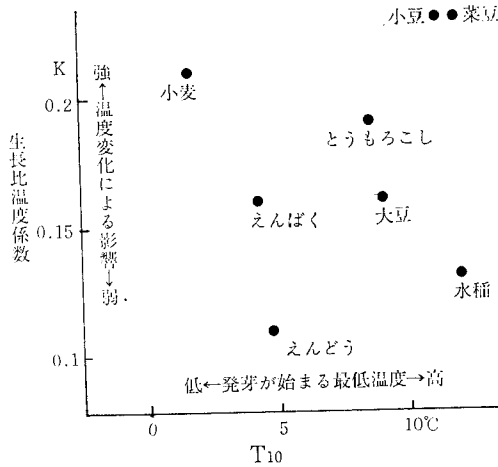


図-3 作物別の感温特性

と組み合わせて、作物別の発芽時における感温特性を論ずることができる(図-3)。最低温度とは低温のため発芽しない限界の温度である。ここでは実用的意味を持たせるために最低温度を用いず、 $T_{10}$ (発芽に10日を要する温度)を横軸にとった。農家が播種する際には、7~10日で発芽することを期待して播種するので、 $T_{10}$ は播種される時の地温に相当するものである。

水稻、大豆、とうもろこし、小豆、菜豆は地温が10°C附近で播種される点で似ているが、図でわかるように、生長比温度係数はそれぞれ異なり、水稻が最も低く、小豆、菜豆で最も高い。このように、生長比温度係数を用いて作物の発芽時における感温特性を把握することができる。

⑥ Kは種子発芽の例ばかりでなく、生物活性を解析する際には、後述するように、実用的な面で広く活用できるものである。

### 3 生物活性と温度との関係の解析法

自然界での生物活性は温度の日変化によって時々刻々変化しているし、また季節変化をしている。従って自然界に起こる現象を理論的に解析する際には、まず温度との関係を把握しなければならない。

生物活性と温度との関係を調べる際に、反応生成物の生成速度に着目して取り扱う方法としては、①温度を10°C上昇させると反応速度が通常2~3倍になるが、これを $Q_{10}$ で表わす方法、②有効積算温度の法則(生物活性は生育零点の温度D以上の有効積算温度に比例する)を用いる方法。この場合には(1)式が用いられる。③速度論的に取り扱う方法の3通りがある。①は反応速度の比を $Q_{10}$ で表わすだけであるから、最も現象的な方法である②は反応速度式が未知の場合には他に方法がないという

$$N \approx (T - D) t \quad (1)$$

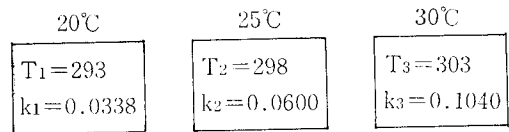
( N ; 生成量  
T ; 絶対温度  
D ; 生育零点の温度  
t ; 時間 )

意味で有効な方法である。反応速度式が見出せた場合には③の方法が最も良いのはいうまでもないことである。酵素反応を取扱う分野では③の方法が圧倒的に多いのに対し、高等生物を取扱う分野では反応系が複雑なので②の方法を用いる例が多い。

一般に生物活性は酵素反応が律速反応になっている場合が多いので、Michaelis-Menten式あるいは一次反応式が適用される場合が多いであろう。そこで、まず、一次反応式のモデルを用いて有効積算温度の方法の適用範囲と限界について検討を加えた。

#### 1) 有効積算温度の方法の適用範囲

図-4に示したように温度3段階での実験モデルを設定し、(2)式の一次反応式を用いて生成量を計算して図-5-aに生成曲線を示した。実際の実験では図-4中の



$E_a = 20,000 \text{ cal}$   
 $N_0 = 10 \text{ mg}$

図-4 一次反応式の実験モデル

$E_a$ ,  $N_0$ ,  $k$ は未知数で、図-5-aの生成曲線データからそれらを求めることになる。

$$N = N_0 (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

( N ; 時間 t における生成量  
N<sub>0</sub> ; 最大生成量  
k ; 速度定数  
t ; 時間 )

有効積算温度の方法を用いて解析する場合には、(1)式中の生育零点の温度Dを求めることとなる。その方法は任意のDを用いてNと(T-D)tとの相関を算出して、相関が最も高い場合のDの値を生育零点とする。この操作は図-5-bに示したように、時間軸を変換してそれぞれの曲線を1つの曲線上に重ね合わせるために、生育零点あるいは変換係数(T-D)を求める操作に他ならない。図-5から時間軸変換をすることによって、1つの曲線上に重ね合わされていることがわかるであろう。この操作で生育零点を求める方法を筆者は時間軸変換法と名付けた。この方法で得られた新しい曲線を1曲線と呼ぶ(ただし、広い温度範囲では一般には重ならない)。

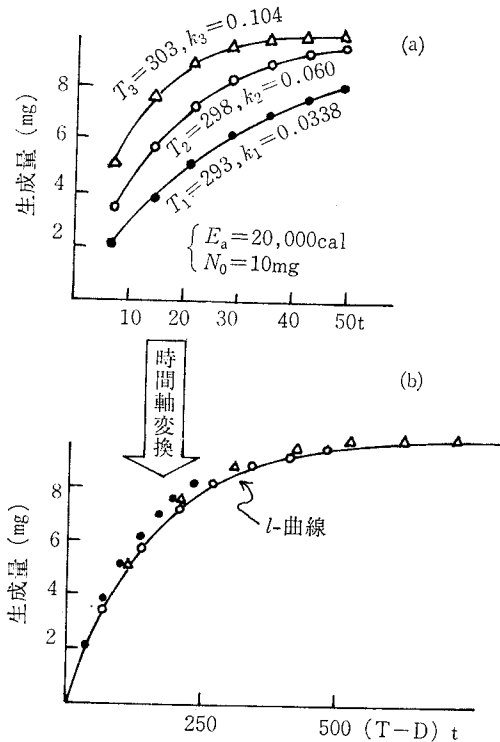


図-5 一次反応式のモデル曲線  
 a) 温度3段階の生成曲線  
 b) 有効積算温度と生成量

l-曲線を(13)式で表わすと、図-5-aの3曲線が図-5-bで重なるためには、 $k'$ と $k_1, k_2, k_3$ との間には(14)式が成り立たなければならない。

$$N = N_0(1 - e^{-k'(T-D)t}) \quad (13)$$

$$k' = \frac{k_1}{T_1 - D} = \frac{k_2}{T_2 - D} = \frac{k_3}{T_3 - D} \quad (14)$$

一方、速度定数 $k$ と温度 $T$ の間にはアレニウスの法則が適用され、(3)式が成り立つ。これを図示したのが図-6の $k-T$ 曲線である。図-6の $k_2$ における接線と温度軸との交点を $D$ とし、 $k_1, k_2, k_3$ が仮りにその接線上に乗っているとするとすれば、3つの三角形 $DT_1k_1, DT_2k_2, DT_3k_3$ は相似形であり、各辺の比が等しいので(14)式が成り立つことがわかる。さらに図-6の $k_2$ における接線と温度軸との交点 $D$ が生育零点 $D$ であることがわかる。

このように有効積算温度の方法は(14)式が成り立つことを前提としているが、 $k_1, k_2, k_3$ が直線上にある場合のみ成り立つのであって、図-6から明らかなように直線上にはなく、従って、(14)式は厳密には成り立たないのである。

以上、反応モデルを用いて有効積算温度の方法について吟味した結果を要約すると次の通りである。

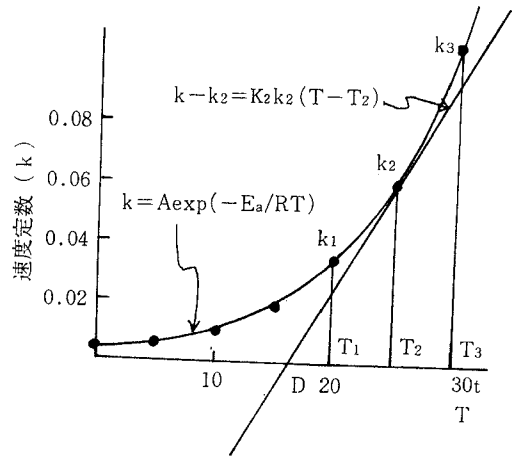


図-6  $k-T$  曲線

① 有効積算温度の方法というのは、時間軸を変換してグラフ上に重ね合わせるための変換係数 $(T-D)$ を求める操作に他ならない。従って、この方法を時間軸変換法と名付けた。

② 反応モデルを用いて検討した結果、時間軸変換法では厳密には重ならないことがわかった。

③ 生育零点を求める一般式は、図-6の接線と時間軸との交点の座標から求め、(13)、(16)式で表わされる。ただし、(13)式は温度範囲のない場合の式であり、(16)式は温度範囲のある場合の式で補正項が入る。

$$D = T_2 - \frac{1}{K_2} \quad (15)$$

$$D = T_2 - \frac{1}{K_2} - \frac{K_2(\Delta T)^2}{3} \quad (16)$$

( $T_2$ : 平均温度,  $\Delta T = T_3 - T_2 = T_2 - T_1$   
 $K_2$ : 平均温度における反応速度比温度係数)

④ 図-6からわかるように、20~30℃の範囲で実験する場合と15~25℃で行う場合とでは、接線と温度軸との交点の位置が変わるので生育零点の温度が異なる。従って有効積算温度の法則の中で用いられる生育零点は計算上の基準温度であって、温度範囲が変れば変わるもので、その意味で相対値であり絶対値ではない。

これに対し、例えば「10℃以下では硝酸化成がすすまない」という表現をする場合の10℃は絶対値であり、概念が異なる。従って、本稿では前者を生育零点(相対値)と仮称し、生理的零点(生物の生活活動が低温のために停止する限界の温度)と区別して使用した。

⑤ 以上のような検討から有効積算温度の方法の適用範囲は次の通りである。適用範囲は(14)式が近似的に成り立つ範囲であり、①温度範囲が狭い場合、②活性化エネ

ルギーが比較的小さく、 $k-T$ 曲線の湾曲率が小さい場合、⑤速度定数が小さい場合、等である。

⑥ 有効積算温度の方法には上述のように温度範囲が広い場合には適用できない欠点があるが、その改良法について検討し、近いうちに発表する予定である。

2)  $E_a$ ,  $K$ ,  $D$ および $Q_{10}$ の相互の関係

見かけの活性化エネルギー  $E_a$ 、反応速度比温度係数  $K$ 、生育零点  $D$ および  $Q_{10}$  の4つのうち、1つが測定されれば、相互に計算できる関係にある。これらの相互の関係を表-2のようにまとめておけば便利である。

$K$ ,  $D$ ,  $Q_{10}$  は温度によって変るので、温度を指定しなければならぬが、 $E_a$  は温度を指定しなくてよい。それぞれを求める計算式は(14), (17), (18)式である。

この表で注目して欲しい事は、15℃における  $D$  と25℃における  $D$  の差は大きく約9℃もあるのに対し、 $K$  の場合は7%の差しかない。従って  $D$  を用いて解析するよりは、 $K$  を用いた方が広い温度範囲の解析が可能となる。その方法についてはいずれ発表する。

表-2  $E_a$ ,  $K$ ,  $D$ ,  $Q_{10}$  の相互関係

$E_a$ (cal)	$K$		$D$		$Q_{10}$	
	15℃	25℃	15℃	25℃	10~20℃	20~30℃
10,000	0.0608	0.0568	-1.4	7.4	1.84	1.76
11,000	0.0668	0.0624	0.0	9.0	1.95	1.87
12,000	0.0729	0.0681	1.3	10.3	2.07	1.98
13,000	0.0790	0.0738	2.3	11.4	2.20	2.09
14,000	0.0851	0.0795	3.2	12.4	2.34	2.21
15,000	0.0912	0.0851	4.0	13.2	2.49	2.34
16,000	0.0972	0.0908	4.7	14.0	2.64	2.48
17,000	0.1033	0.0965	5.3	14.6	2.81	2.63
18,000	0.1094	0.1022	5.9	15.2	2.99	2.78
19,000	0.1155	0.1078	6.3	15.7	3.17	2.94
20,000	0.1215	0.1135	6.8	16.2	3.37	3.11
21,000	0.1276	0.1192	7.2	16.6	3.58	3.29
22,000	0.1337	0.1249	7.5	17.0	3.81	3.64
23,000	0.1398	0.1305	7.8	17.3	4.05	3.86
24,000	0.1458	0.1362	8.1	17.7	4.30	4.09
25,000	0.1519	0.1419	8.4	18.0	4.57	4.34

$$E_a = \frac{R \ln Q_{10}}{(1/T_1 - 1/T_3)} \quad (17)$$

$$E_a = R \cdot T_2^2 \cdot K_2 = R \cdot T_2^2 \frac{1}{T_2 - D} \quad (18)$$

$$D = T_2 - \frac{1}{K_2} \quad (15)$$

( $T_1$ : 下限温度,  $T_3$ : 上限温度,  $T_2$ : 平均温度)

4 土壌における有機態窒素無機化過程の速度論的解析の試み

土壌中の有機態窒素は、微生物活動によって無機化されて無機態窒素となる。この分解過程は複雑であるが、無機態窒素の生成速度に着目して速度論的に解析できる。土壌に添加された有機態窒素の無機化過程を解析する場合は、添加量を人為的に変えられるので、添加窒素量を既知量として取り扱うことができるのに対し、土壌中で生成した有機態窒素の場合は、窒素量が未知なので解析が複雑となる。以下に、それぞれの例について述べる。

1) 合成緩効性窒素肥料 (CDU) の分解

合成緩効性窒素肥料 (2-オキソ-4-メチル-6-ウレイドヘキサヒドロピリミジン, CDUと略す) の土壌中での分解を速度論的に解析した筆者らの解析法は<sup>23)</sup>、他の各種含窒有機物 (堆肥, 緑肥など) にも適用できると考えられるので、解析手順をやや一般論的に述べる。

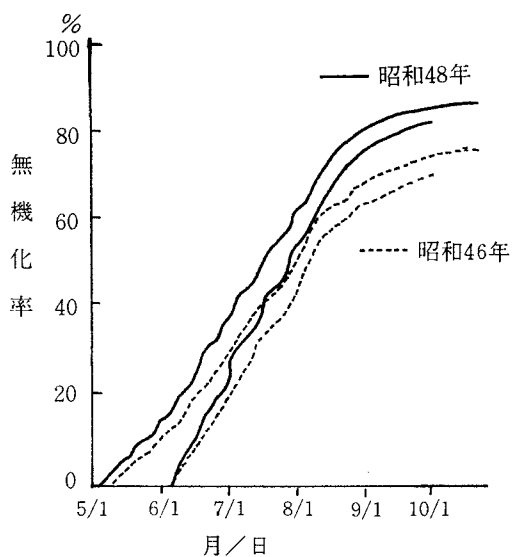
まず、含窒有機物中の窒素の無機化がどのような反応速度式に従うかを見出すことが第一段階である。CDU-Nは水田土壌中で一次反応式に従って無機化することはすでに知られている<sup>4)</sup>。一方、筆者らは畑土壌でのCDU-Nの無機化がMichaelis-Menten式に従うことを見出した。この式は酵素反応の基本的速度式であり、CDUの添加量が少ないときは一次反応式で近似できるので、過去の知見と矛盾しない。また、この式が適用できることは、CDUの分解において微生物分解が律速反応であると推定する根拠の1つとなる。

第二段階は、無機化速度と温度との関係を定量的に求めることである。筆者らはアレニウスプロットから、畑土壌中のCDU分解の見かけの活性化エネルギーとして24,000calを得た。

こうして得られたCDU-Nの無機化に関する速度式及び温度との関係式と地温測定値とを用いて、圃場での窒素無機化パターンを推定することができた。

図-7は十勝の地温データを用いて推定したCDUの無機化パターンである。昭和46年は低温年、昭和48年は高温年であり、5月1日施肥と6月1日施肥の場合の曲線である。5割以上が無機化される時期は7月中~下旬であり、緩効性肥料の特長が出ている。

こうして得た無機化パターンが果して妥当な推定値になっているか否かを調べた。てん菜ととうもろこしを用い、共通肥料としてリン酸とカリを与え、速効性N肥料で栽培した場合と、CDU-Nのみで栽培した場合のN利用率を比較した。てん菜の場合では、速効性Nの利用率は6月27日39%、7月19日73%に対し、CDU-Nの



図一七 C D U 無機化率

利用率は推定無機化量に対し64, 72%であった。とうもろこしでは、速効性Nの利用率は7月25日45%, 10月1日78%に対し, C D U-Nの利用率は推定無機化量に対して58, 59%であった。作物によるC D U-Nの利用率が60~70%という数値から, 上記の推定法がほぼ妥当なものであると考える。

以上要するに, 圃場における生物活性を理論的に解析する上で速度論的解析法は有力であると考ええる。

## 2) 土壌窒素無機化の解析

土壌窒素の無機化過程を解析する場合は, 有機態窒素量が未知数なので解析が複雑である。

最近 Stanford らは土壌窒素の無機化について速度論的解析法を提案した<sup>5)</sup>。この解析法は, 窒素の無機化速度が可分解性の窒素量に比例すると仮定し, 一次反応式を用いた。実験は30週間の長時間培養で, pH変化などを避けるために洗滌培養法を用いている。また, 一次反応式【(2)式】の未知数 $N_0$ ,  $k$ の求め方は, 任意の $N_0$ を代入して $t$ と $\log(N_0 - N)$ の相関が最も高い場合の $N_0$ を探す方法を用いた。

ところで, 一次反応式の未知数 $N_0$ と $k$ を求めるには Guggenheim の方法<sup>6)</sup>が広く知られているが, この方法を土壌窒素無機化に適用することは全く試みられていなかった。その理由は測定回数が少ないからである。しかし, 生成物の変化率の低い部分においては, 若干の仮定をおいて使うならば有力な方法であり, この方法を導入する必要がある。

筆者らは, 土壌窒素の無機化に関する新しい解析法を考案した<sup>7)</sup>。この方法は従来から用いられているピーカー培養法にも適用でき, 培養期間も短かく(7~8週),

測定回数も少なく(約5回), 温度3段階で培養して温度に関する情報も得ることができる。ただし, 測定回数が少ないので精度は犠牲になるが, 一方過去のピーカー実験のデータを活用できる利点がある。

この解析法の特徴は①土壌窒素無機化過程の律速反応は一次反応であると仮定し, ②速度定数と温度との関係はアレニウスの式に従うと仮定し, ③数表を作成して解析する点にある。筆者らの解析法から得られる情報ならびに北海道十勝の乾性火山性土について得られた数値を表一3に示した。

表一3 得られる情報と実測例(乾性火山性土)

$N_0$ : 可分解性の窒素量	3.55mg/100g
$k$ : 各温度に対応する速度定数	0.0228(25°C)/day
$t_{1/2}$ : 各温度における半減期 ( $=0.6931/k$ )	30.4days
$E_a$ : 見かけの活性化エネルギー	10,571cal/mol of N
$K$ : 反応速度比温度係数	0.060(25°C)/deg
$D$ : 生育零点	7.8°C(20~30°C)

以上, 速度論的解析法として Stanford らの方法及び筆者らの方法にふれたが, これらの方法は土壌窒素無機化過程の律速反応は一次反応であるという単純なモデルを前提においている。しかし, このような単純なモデルでは説明できない土壌もあり, より複雑なモデルを想定して説明できる土壌もあり, その方法については近く発表する予定である。

このように単純なモデルから出発して, より複雑なモデルの解析法を見出すことによって, 土壌の本質的な性質を明らかにできるものと考ええる。

## 3) 既往のデータの整理

土壌中の生物活性を速度論的に取扱った報告は少ないが, 温度を変えて生物活性を測定した報告は多い。それらについて, 前節で述べた考え方を用いて整理し, 表一4に土壌窒素の無機化, 堆肥の分解, ワラの分解, 炭酸発生, C D U-Nの無機化について, 活性化エネルギーの大きい順に並べた。表からわかるように  $E_a$  は10,000~24,000calの範囲にあり, 酵素反応の  $E_a$  の範囲(5,000~25,000cal)に相当している。このように, データを整理して相互に比較してみると, 土壌窒素無機化における  $E_a$  は水田と畑では異なること, 堆肥とワラでも異なること, さらにアメリカの畑土壌と北海道十勝の乾性火山性土とは速度定数が異なること等がわかり, 土壌間の特性的相違を論ずる上で重要な指標になることがわかる。このようなデータを蓄積することによって, 本質論的な研究へと発展するものと考ええる。

表-4 既往のデータの整理

Ea(cal)	k(25℃, 1/day)	内 容	土 壤	文 献
24,000	0.028	C D U窒素無機化	褐色火山性土・畑	斉藤, 藤田, 金野 <sup>3)</sup>
20,000	0.04~0.06	土壌窒素無機化	水田土壌	吉野, 出井 <sup>8)</sup>
19,000	0.0035	堆肥の分解	畑土壌	速水, 竹内 <sup>9)</sup>
16,000	{ 0.8mg CO <sub>2</sub> 1.15 " 1.30 "	炭酸発生	褐色火山性土・畑	中島田 <sup>10)</sup>
		"	黒色火山性土・畑	
		"	沖積土・畑	
12,600	0.00407	土壌窒素無機化	11種類の畑土壌平均	Stanford, et al. <sup>11)</sup>
10,600	0.0228	土壌窒素無機化	褐色火山性土・畑	金野, 斉藤 <sup>7)</sup>
10,000	{ 0.011 0.0082	ワラの分解	畑土壌	速水, 竹内 <sup>9)</sup>
		"	水田土壌	

5 土壌微生物活性の熱測定

最近の農業事情の急激な変化に伴って、農耕地の砂漠化あるいは悪化が懸念されている。土壌中には多種多様の微生物が棲息しており、微生物群を構成している。それぞれの土壌は、環境と履歴によって特徴のある微生物群を構成するようになる。人間活動が土壌微生物生態にどのように作用するか、悪化させていないかどうかを評価するには、それに適した土壌微生物活性の測定法を開発しなければならない。

近年、高橋らの研究グループは酵母の生育系の熱測定を行ない、それに速度論的解析法を導入した<sup>12)</sup>。筆者は数年前にこの研究グループに参加する機会を得、その方法を応用して熱測定が土壌微生物活性測定に有効であることを見出した<sup>13)</sup>。その後、さらに理論的解析法に検討が加えられ、土壌環境汚染の生態学的評価法の検討が引き続き行なわれている<sup>14)15)</sup>。

熱測定が今後どのように活用されるかは未知であるが、

ここでは6種の糖類 (D-Glucose, Galactose, Mannose, Fructose, Sucrose, Lactose) を基質とし、温度を22~48℃まで11段階変えて、微生物増殖カーブを速度論的に解析した例を紹介する<sup>16)</sup>。

図-8は30℃で十勝川沖積土に各種の糖と窒素とを添加した場合の発熱カーブ (サーモグラム) である。このサーモグラムは微生物の増殖の際のサーモグラムと本質的に同一で、誘導期、対数増殖期および静止期に対応する形状を示す。

図からわかるように、Sucrose, Glucose, Fructoseでは増殖が早く、Mannose, Galactose がこれに次ぎ、Lactose で最も遅い。対数増殖期のカーブを速度論的に解析することによって、それぞれの糖について微生物の増殖速度及び平均細胞分裂時間が求まる (微生物増殖サーモグラムの定量的取扱い並びに速度論的解析法については、高橋の講座を参照されたい<sup>17)</sup>)。

さて、上記の計算を行うと、平均細胞分裂時間は糖によって異なるが、1.5~2.6時間という数値が得られる。

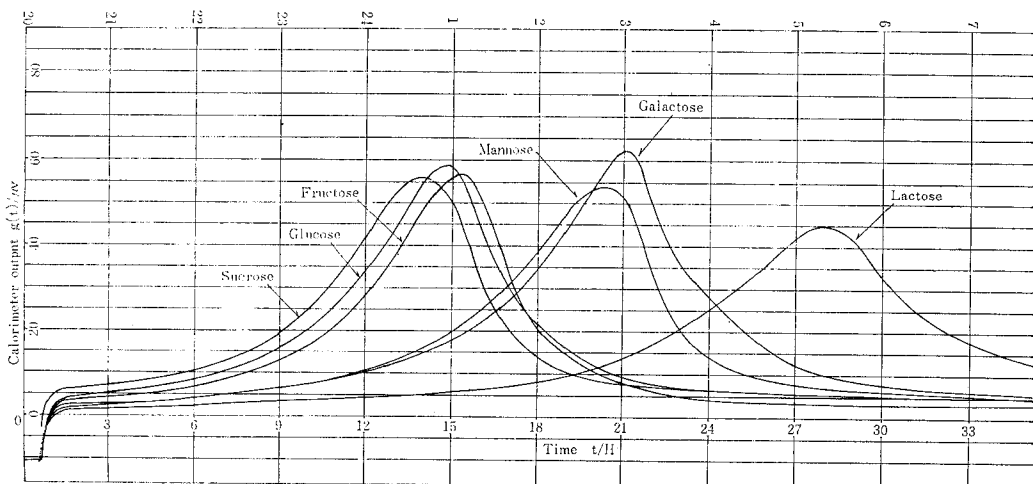
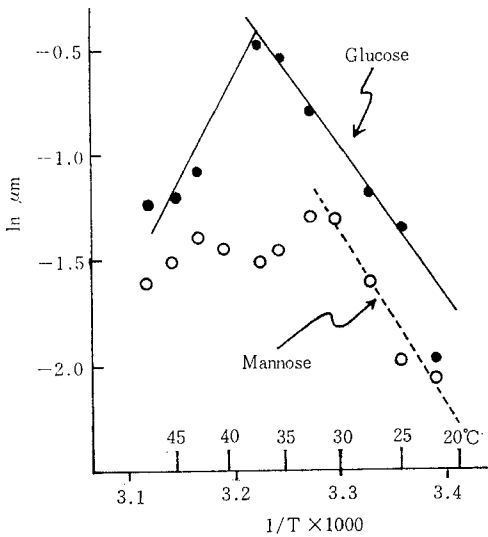


図-8 Thermograms at 30℃



図一 土壌微生物活性のアレニウスプロット

**Table 5** Apparent thermodynamic parameters of activation and optimum temperatures of cultivation of soil microbes obtained from the heat evolution during the decomposition of various sugars

Sugars	Apparent thermodynamic parameters $\Delta H^\ddagger$ (kcalmol <sup>-1</sup> )	$\Delta S^\ddagger$ (e. u.)	optimum temperatures (°C)
Glucose	+14.5	+20.7	36.9
Galactose	+18.3	+34.1	33.0
Mannose	+17.1	+30.0	31.0
Fructose	+19.0	+36.5	35.6
Sucrose	+16.7	+29.0	36.2
Lactose	+20.2	+60.8	32.4

$\Delta H^\ddagger$  : 活性化エンタルピー

$\Delta S^\ddagger$  : 活性化エントロピー

Lactoseの増殖速度はGlucoseに比してそれほど低くなく、従ってLactoseの場合に増殖がおくれたのは、誘導期が長かったためであるといえることができる。

次に増殖速度と温度との関係をアレニウスプロットしたのが図一9である。その形状は30~40°C附近にピークを持ち、30°Cを越えると酵素蛋白の変性によるとみられる不規則的な変動した形状となる。これは酵素反応特有の形状とよく類似している。このことは、土壌のような生態系においても、微生物群の示す活性は、酵素が示す活性と同様の取扱いができることを示している。

最後に、アレニウスプロットから活性化エンタルピー及び活性化エントロピーを求めて表一5に示した。これらの数値は土壌生態系の中での微生物増殖過程について

の重要な情報を与えているものと考えられるが、それらの解釈については、今後の研究が待たれる。

### 要 約

種子発芽速度、有機態窒素の土壌中での無機化、土壌微生物活性の熱測定等の土壌中での生物活性と温度との関係を論じた。また、有効積算温度の法則を用いた解析法と速度論的解析法について理論的に考察した。

1 或る温度範囲内における系1と系2の種子発芽速度の比(又は発芽日数の比)を理論的に導いた。

Kを発芽における生長比温度係数と定義した。狭い温度範囲内では、Kは定数で作物固有の数値であり、1°Cの温度変化によって受ける影響の強さを表わす数値であることを明らかにした。

2 有効積算温度の解析法の適用範囲と限界について論じた。この方法は時間軸を変換してグラフ上で1つの曲線上に重ね合わせるために、生育零点D又は変換係数(T-D)を求める操作に他ならないことを明らかにした。そして、この方法を時間軸変換法と名付けた。また生育零点の温度Dと速度定数比温度係数Kとの関係式を理論的に導いた。

3 土壌中での有機態窒素の無機化過程に速度論的解析法を適用した。

3-a) 合成緩効性窒素肥料(CDU)の畑土壌中での無機化過程にはMichaelis-Menten式が適用できることを見出した。この式と地温測定値とを用いて圃場での無機化パターンを計算し、CDUの肥効を論じた。

3-b) 土壌中での有機態窒素の無機化が一次反応式に従うと仮定した速度論的解析法について論じた。この方法で得られる情報と火山灰土壌での実測値とを表に示した。有機態窒素の無機化、堆肥及びワラの分解、土壌の炭酸発生、CDUの無機化等の活性化エネルギーを既往の論文から計算し、その大きい順に並べた。これらの数値は酵素反応の活性化エネルギーの範囲内にあった。

4. 有機物を分解する際の熱測定を用いた土壌微生物活性と温度との関係を論じた。

### 引用文献

- 1) 金野隆光(1976):北海道農試研究資料, 8, 43
- 2) 金野隆光・藤田 勇・齊藤元也(1978):土肥講演要旨集, 24, Part II, 11
- 3) 齊藤元也・藤田 勇・金野隆光(1978):土肥講演要旨集, 24, Part II, 11
- 4) 石橋博明・潮田常三(1972):土肥誌, 43, 137
- 5) G. Stanford and S. J. Smith(1972): Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36, 465



- 6) E. A. Guggenheim (1926): Philos. Mag. Ser. 7. 2. 538
- 7) 金野隆光・斎藤元也 (1978): 土肥講演要旨集, 24, 105
- 8) 吉野 喬・出井嘉光 (1977): 農事試験場報告, 第25号, 1
- 9) 速水和彦・竹内 豊: 未発表
- 10) 中島田 誠: 未発表
- 11) G. Stanford, M. H. Frere and D. H. Schwaninger (1972): Soil Sci., 115, 321
- 12) 伊藤重一・橋本 衛・高橋克忠 (1972): 第8回熱測定討論会, 74
- 13) 金野隆光 (1976): 熱測定, 3, 148
- 14) 川端達夫 (1978): 大阪府立大学農学部修士論文
- 15) 山野秀樹 (1979): 大阪府立大学農学部修士論文
- 16) H. Yamano and K. Takahashi (1978): Satellite Meeting of the Six Intern. Biophys. Congress., Kyoto.
- 17) 高橋克忠 (1978): 熱測定, 5, 66

(1979.12.24受稿)

### 質 疑 応 答

岩田 (農技研) 種子の発芽の問題を, アレニウスの式を用いて論じておられるが, 種子の発芽に際して生起する多数の酵素反応の中のひとつが, 発芽を律速していると考えておられるのだろうか。

金野 (東北農試) 生物活性を論議する場合には, 多くの酵素反応が関係してくる。一般に反応系がどんなに複雑でも律速反応は1つであるという前提で論議ができる。しかし, 条件が変われば律速反応が変わるので注意が必要である。生物活性と温度との関係を論ずる場合には, アレニウスプロットが直線の関係にあるか, 折れ曲るかでチェックできる。アレニウスプロットが直線の関係にある範囲では律速反応が1つで変わらないという前提で論議している。

安富 (茨大) 土壌の微生物による有機質分解または作物の成長の化学反応速度について, 土の粒径や比表面積がどのように影響するか, もし知見があればお教え願いたい。

金野 (東北農試) 今のところ, その問題について検討しておりませんのでわかりません。

古畑 (農技研) C D U-Nの分解速度と温度との関係の中で, 地温が用いられているが, どのように求めた地温なのだろうか。

金野 (東北農試) 北海道農試畑作部における深さ5 cmの毎日の最高最低温度を使用し, sin 曲線になると仮定して, 1時間毎の地温をコンピューターで推定したものをを使用した。

## Temperature Effect on the Biological Activity of Soil

Takamitsu KONNO

Tohoku National Agricultural Experiment Station

### Summary

Temperature effect on the biological activity of soil such as germination speed of seeds, mineralization of organic nitrogen in soil, and activity of soil microbes as measured from heat evolution was discussed. Two methods using the law of total effective temperature and kinetic analysis were theoretically examined.

1. Within a certain range of temperature, relative germination speed (or relative number of days needed for germination) of system 1 to system 2 was derived from the theory.

K was defined as a coefficient of temperature relation to the rate of growth. Under the conditions of a certain narrow range of temperature, K was a constant and inherent value for a crop, and this coefficient indicated the degree of influence that a change in temperature by 1 °C gave to the germination speed of a crop.

2. Range of application for analysis using the law of total effective temperature

to biological activity was discussed. It became clear that this method is nothing but one to obtain the temperature of criterion D or a coefficient (T-D) in order to place each curve upon the other in the figure by transforming the time axe. Therefor, this method was named to be a method of transforming the time axe. The relationship equation among the temperature of criterion D and temperature coefficient of the rate constant K was theoretically obtained.

3. Kinetic analysis was applied to mineralization of organic nitrogen in soil.

3-a) Rate equation of mineralization of synthetic slow-release nitrogen fertilizer (CDU) was found out to be the equation of Micaelis-Menten. Using this rate equation and the data of soil temperature, transition of mineralized nitrogen in field was calculated, and fertilizer response of CDU to crops was discussed.

3-b) Kinetic analysis assuming that mineralization of organic nitrogen in soil followed the first-order equation was discussed. Informations obtained by this analysis and values measured in volcanic ash soil were made into table. Activation energies of several processes such as mineralization of organic nitrogen, decomposition of farm yard manure and straw, occurrence of  $\text{CO}_2$  in soil and mineralization of CDU were calculated on the basis of past reports and arranged according to size. These activation energies were within the range of that in enzyme reaction.

4. Temperature effect on the activity of soil microbes as measured from the heat evolution during the decomposition of organic materials was discussed.