

土壌生物活性への温度影響の指標化と 土壌有機物分解への応用

金 野 隆 光*・杉 原 進**

(1985年10月4日受理)

自然界での生物活性は温度によって時々刻々と変化しているので、生物活性と温度との関係を定量的に把握することが重要である。

著者らは、本報で Arrhenius の法則を用いて生物活性への温度影響を指標化し、温度変換日数を提案した。温度変換日数とは、或る温度で、或る日数おかれた条件が、標準温度に変換すると、何日に相当するかを表したものである。

温度の異なる地域の生物活性を比較するのに25°C 変換日数の有効なことがわかった。地温データから算出した年間25°C 変換日数は、札幌で88～160日、水戸で167～224日、那覇で約330日であった。この数値と有機物分解特性値とから、地域別の有機物の年間分解率を求めるための計算表を作成した。

植物生態気候区分に使用されている温度指数と年間25°C 変換日数とは相互に読みかえできることがわかった。これから、植物生態気候区分を年間25°C 変換日数で同様に区分できた。

25°C 変換日数を計算する際に、日平均温度を用いた値は、日較差を考慮した値より低くなるので、温度較差ならびに活性化エネルギーの大きさと両数値の差の大きさとの関係を調べるための計算表を作成した。

有機物分解特性値と土壌温度とを用いて、土壌中における有機物分解量を予測する方法を考案した。そして予測法の手順を提案した。この予測法を用いて、盛岡における土壌窒素無機化曲線を作図し、高温年での窒素無機化量は低温年より約2.5 kg /10a 多いと推定した。また、下水汚泥が5月に施用された場合の窒素無機化曲線を作図した結果、那覇での窒素無機化速度は札幌の2.4倍になることがわかった。

目 次

I 緒言.....	52	IV 生態気候区分と温度変換日数との関係.....	58
II 温度変換日数.....	53	V 温度較差がある場合とない場合の25°C 変換日数の差.....	58
1 温度変換日数の定義.....	53	VI 有機物分解特性値と土壌温度とを用いた土壌中の有機物分解量の予測法.....	59
2 温度変換日数の理論.....	53	1 有機物分解量の予測法の手順.....	60
III 温度の異なる地域の生物活性の指標.....	56	2 予測法の適用例.....	60
1 地域別の25°C 変換日数.....	56	VII 要約.....	60
2 地域別の有機物年間分解率.....	57	謝辞.....	62
		引用文献.....	62

*環境資源部気象管理科

**資材動態部肥料動態科

Summary	64
Appendix	65
Attached Table	66

I 緒 言

土壤中に生息する生物は有機物分解など土壤中の物質変化に関与しており、それを通じて、土壤の生成、土壤の作物生産能および土壤の浄化能等に密接に関係している。

土壤生態系の環境要因としての土壤気候、特に土壤温度と土壤水分は主要な土壤気候要素である。

土壤気候要素と生物活動との関係を把握するためには、単に量的な大小だけでなく、質的な境界温度をも把握することが必要である。

土壤気候は土壤生成に強く影響する。アメリカの土壤分類のカテゴリーは、目、亜目、大群、亜群、ファミリー、土壤統で構成されている。土壤水分および温度環境は亜目、大群を設定するのに用いられ、また、ファミリーを区分する基準の一つとして年平均土壤温度 8, 15, 22°C が境界温度として用いられている (SMITH, 1967)。

土壤気候は太陽エネルギーと共に、農業生産に深く関わっている。ソ連では耕地の水分状態を表わす指標として、日平均気温 10°C 以上の期間の総降水量と、その期間の有効積算温度との比を水熱係数とし、農業気候区分をするのに用いられている (内嶋, 1981)。

植物生態学の分野では、温度指数 (5°C を基点として、月平均気温の 5°C 以上の数値の年間合計) が用いられている。温度指数の境界値 15, 45, 85, 180, 240 を用いて、気候・植生帯の区分がなされ、また、乾湿度をあらわす気候示数とを組み合わせた気候・植生帯が提案されている (吉良, 1948; 吉良, 1976; 吉良, 1972)。

これらは地球規模の自然生態を対象としたもので、温度と水分が環境要因として重要であることを示している。

自然界での生物活性は温度の日変化によって時々刻々と変化しており、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ためには、まず温度と生物活性との関係を明らかにしなければならない。

生物活性と温度との関係を調べる方法としては三つの方法がある (Table 1)。

Table 1. Methods for analyzing relationship between biological activity and temperature.

1. Q_{10} を用いる方法

温度を 10°C 上昇させると、反応速度が 2 ~ 4 倍になるが、この倍率を Q_{10} で表す方法

2. 有効積算温度の法則を用いる方法

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。

$$N = A \cdot (T - D) \cdot t$$

N ; 生物活性の積算値, D ; 生育零点の温度

T ; 温度, t ; 時間, A ; 定数

3. Arrhenius の法則を用いる方法

生物活性 (または速度定数) と温度の間には次の関係がある。

$$k = A \cdot \exp(-Ea/RT)$$

k ; 生物活性または速度定数, A ; 定数

Ea ; 見かけの活性化エネルギー, R ; 気体定数, T ; 絶対温度

化学反応や酵素反応を取扱う分野では後述する Arrhenius (アレニウス) の法則を用いる例が圧倒的に多いのに対し、高等生物を扱う分野では Arrhenius の法則を用いる例は非常に少ない。

昆虫生態の分野では、有効積算温度を用いる例が多い (BASKERVILLE ら, 1969; 奥代ら, 1975; WATANABE, 1978; 是永ら, 1980; 坂神ら, 1981; 安田, 1982)。

細胞レベルまたは個体レベルでの研究に Arrhenius の法則が使われる例は非常に少ないが、若干の報告がある。例えば、各種植物のミトコンドリアのコハク酸酸化

(LYONS ら, 1970)、キュウリの葉の呼吸速度 (MINCHIN ら, 1973)、種子の発芽速度 (金野, 1976)、土壤微生物の増殖速度 (YAMANO ら, 1983) 等である。

土壤有機物の分解を解析した研究では、 Q_{10} を用いた例 (TABATABAI ら, 1980)、有効積算温度を用いた報告 (吉野ら, 1977) もあるが、最近では Arrhenius の法則を用いた報告が多くなっている (STANFORD ら, 1973; WESTERMANN ら, 1980; NUSKE ら, 1981; RICHTER ら, 1982; ADDISCOTT, 1983; CAMPBELL ら, 1984)。

しかしながら、Arrhenius の法則を用いて解析した

にもかかわらず、特性値を見かけの活性化エネルギー E_a で報告しないで、 Q_{10} を温度係数として報告している (STANFORD ら, 1973; WESTERMANN ら, 1980; CAMPBELL ら, 1984)。 Q_{10} を温度係数として用いるのは厳密ではないことは、あとで述べる。

また、室内実験を実施して有機物分解の特性値を求めるための温度条件が研究者によって不統一である。そのため報告された特性値を相互に比較することは困難である。生物熱力学合同委員会が指摘しているように、「標準温度は、大多数の既存の化学的データとの比較を容易にするために、25°C を選ぶ」ことが必要である (広海ら, 1977)。

Table 1 の三つの方法の特徴は、ある生物反応の特性値として、 Q_{10} または生育零点の温度 D あるいは見かけの活性化エネルギー E_a を求めることにある。ある生物反応の活性が Arrhenius の法則に従う温度範囲内にあるならば、 Q_{10} 、 D 、 E_a は相互に読みかえができることを著者は既に報告した (金野, 1980)。

見かけの活性化エネルギー (以下、活性化エネルギーと略す) E_a は化学反応速度論あるいは酵素反応速度論において、その概念は明確である (山辺, 1968; 鍵谷, 1970; 小野, 1975)。これに対し Q_{10} および D は理論的概念は明確ではない。有効積算温度で用いられている D は、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) とは異なることを指摘し、著者は D を生育零点と呼び、生理的零点とは区別して用いている (金野, 1980)。また同一反応においても Q_{10} および D は温度範囲が変れば違うので、温度範囲を明記しなければならないのに対し、活性化エネルギー E_a は温度範囲を明記する必要がない (金野, 1980)。そのような意味で Q_{10} あるいは D を生物反応の特性値として用いるのは不適當である。

さらに最近の動向として、生物活動による物質変化をシミュレーションする研究が多くなっている。そのような場合にモデルの中に温度係数として Q_{10} または D を用いるよりは、Arrhenius の式を用いる方が便利であり、精度も高い。

このように Arrhenius の法則で用いられている活性化エネルギー E_a は、従来から使用されている Q_{10} や生育零点 D よりも優れた特性値である。しかしながら、有効積算温度の法則では“有効温度”という温度の指標 (概念) があるのに対し、Arrhenius の法則を用いた場合の温度の指標 (概念) が確立していないのが現状である。そこで、Arrhenius の法則を用いた生物活性へ

の温度影響の指標について検討した。

本論文では、生物活性への温度影響の指標としての温度変換日数を提案し、その有用性を論じ、さらに、有機物分解予測への適用例について報告する。

II 温度変換日数

1. 温度変換日数の定義

生物活性への温度影響の指標として、温度変換日数を次のように定義する。

〔定義〕温度変換日数とは、ある温度で、ある日数おかれた条件が、標準温度に変換すると、何日に相当するかを表わしたものである。

Table 2 に盛岡、筑波、筑後の4月の地温を用いて、25°C に変換した日数の計算例を示した。4月は30日間あるが、25°C に変換した日数は、盛岡では6.4日間に相当し、筑波では10.7日間、筑後では12.2日間に相当するという使い方をする。

有効積算温度が“ある期間の有効温度”という概念であるのに対し、温度変換日数は“標準温度に換算した日数”である。

温度変換日数を計算する際に用いられる標準温度は、対象とする生物や、その生物が生息する環境の温度によっては適切な温度を選定しなければならないが、生物熱力学合同委員会の提案 (広海ら, 1977) に従って、25°C を標準温度として用いることにする。

2. 温度変換日数の理論

温度変換日数の理論は次の二つの仮定から導かれる。

〔仮定 1〕温度と反応速度定数との関係は次のような Arrhenius の法則に従う。

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad (1)$$

k : 速度定数 [day^{-1}]

A : 定数

E_a : 見かけの活性化エネルギー [cal mol^{-1}]

R : 気体定数 [$1.987 \text{ cal deg}^{-1} \text{ mol}^{-1}$]

T : 絶対温度 [deg]

〔仮定 2〕系 1, 系 2, 系 3 …… 系 n のそれぞれの温度を $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$, 速度定数を $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ とし、同一反応量になるまでの反応時間を $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ とすると、それぞれの系の速度定数 k と反応時間 t との積は一定である。

$$k_1 \cdot t_1 = k_2 \cdot t_2 = k_3 \cdot t_3 = \dots = k_n \cdot t_n = \text{一定} \quad (2)$$

Table 2. Example of calculation of monthly DTS.

April Day	Morioka			Tsukuba			Chikugo		
	Soil Temp.	DTS		Soil Temp.	DTS		Soil Temp.	DTS	
		Daily	Sum		Daily	Sum		Daily	Sum
1	4.1	0.150	0.150	9.3	0.247	0.247	9.0	0.240	0.240
2	4.2	0.151	0.301	9.5	0.251	0.498	11.0	0.289	0.529
3	3.8	0.145	0.447	10.7	0.281	0.779	12.4	0.329	0.858
4	3.5	0.141	0.588	11.6	0.306	1.085	13.2	0.354	1.212
5	3.6	0.143	0.731	12.5	0.332	1.417	11.0	0.289	1.502
6	3.7	0.144	0.875	12.8	0.342	1.759	12.0	0.317	1.819
7	4.5	0.156	1.030	12.6	0.335	2.094	12.4	0.329	2.148
8	3.9	0.147	1.177	12.1	0.320	2.414	12.5	0.332	2.480
9	4.1	0.150	1.327	12.7	0.338	2.753	14.0	0.381	2.861
10	4.4	0.154	1.482	13.5	0.364	3.117	15.8	0.449	3.310
11	4.5	0.156	1.637	14.0	0.381	3.498	16.7	0.486	3.796
12	4.9	0.162	1.799	12.8	0.342	3.839	14.6	0.402	4.199
13	6.6	0.191	1.990	11.4	0.300	4.140	13.6	0.367	4.566
14	7.9	0.216	2.206	11.7	0.309	4.448	14.5	0.399	4.965
15	8.6	0.231	2.437	11.9	0.314	4.763	14.5	0.399	5.364
16	8.7	0.233	2.670	12.3	0.326	5.089	14.1	0.385	5.749
17	9.2	0.244	2.915	12.9	0.345	5.433	13.5	0.364	6.113
18	8.1	0.220	3.135	12.7	0.338	5.772	14.1	0.385	6.497
19	8.1	0.220	3.355	12.4	0.329	6.101	14.7	0.406	6.903
20	8.4	0.227	3.582	13.1	0.351	6.452	16.5	0.478	7.381
21	10.4	0.273	3.855	13.6	0.367	6.820	15.4	0.433	7.814
22	10.7	0.281	4.136	14.4	0.395	7.215	18.0	0.546	8.360
23	10.4	0.273	4.410	15.0	0.417	7.632	17.8	0.536	8.896
24	9.5	0.251	4.661	15.0	0.417	8.049	17.3	0.513	9.409
25	10.3	0.271	4.932	14.7	0.406	8.456	16.0	0.457	9.865
26	11.3	0.297	5.229	15.7	0.445	8.900	18.0	0.546	10.411
27	11.2	0.295	5.524	15.8	0.449	9.349	16.2	0.465	10.876
28	10.8	0.284	5.808	15.4	0.433	9.781	14.4	0.395	11.272
29	11.0	0.289	6.097	15.9	0.453	10.234	16.1	0.461	11.732
30	10.4	0.273	6.371	16.5	0.478	10.712	17.2	0.508	12.241
Monthly DTS		6.4days		10.7days			12.2days		

DTS is the number of days transformed to 25°C.

The equation of calculation : Daily DTS = $\exp[Ea(T - 298)/596T]$

Where T is absolute soil temperature (10cm) and Ea is taken 15,000.

Morioka : daily mean soil temperature of Apr. 1976

Tsukuba : daily mean soil temperature of Apr. 1985

Chikugo : daily soil temperature at 9 o'clock of Apr. 1985

次に、標準温度 T_s における速度定数を k_s 、同一反応量になるまでの反応時間を t_s とすると、(1)と(2)式から次式が導かれる。

$$t_s = t \cdot k / k_s = t \cdot \exp[Ea(T - T_s)/RTT_s] \quad (3)$$

$\exp[Ea(T - T_s)/RTT_s] = m$ とすれば、次式が求まる。

$$t_s = t \cdot m \quad (4)$$

(4)式で t_s を温度変換日数、 m を変換係数と呼ぶ。

(3)式からわかるように、活性化エネルギー Ea を室内実験で求めることができれば、圃場条件（自然条件）下での反応時間 t を標準温度での反応時間 t_s に変換することができる。

Fig. 1 は温度別有機物分解曲線のモデルである。温度が異なれば有機物 50mg が分解するまでの日数 t は異なるが、日数 t と速度定数 k との積は一定であることがわかる。従って、変換係数 m を用いて (T_s, k_s) 曲線を他の温度での曲線に重ね合わせることができる。また、標準温度における分解曲線を作成することもできる。

生物反応モデルとして(5)~(8)式がある。(5)式は土壌有機物分解モデルとして一般に使われている (STANFORD ら, 1972; NUSKE ら, 1981; CAMPBELL ら, 1984)。(6)式は土壌有機物残存モデルとして使われている (HUNT, 1977; JENKINSON, 1977; HARPER ら, 1981; VAN VEEN ら,

1981; MURAYAMA, 1984)。(7)および(8)式はそれぞれ一般に使用されているモデルである。

$$\text{土壌有機物分解モデル } N = N_0(1 - \exp(-k \cdot t)) \quad (5)$$

$$\text{土壌有機物残存モデル } N = N_0 \exp(-k \cdot t) \quad (6)$$

$$\text{ロジスティック曲線 } N = A / (1 + B \exp(-k \cdot t)) \quad (7)$$

$$\text{微生物増殖曲線 } N = N_0 \exp(-\mu \cdot t) \quad (8)$$

ただし k, μ は速度定数、 N_0, A, B は定数

これらの式について仮定 2 が成り立つことは容易にわかる。しかし、複雑なモデルでは、仮定 2 が成り立つか否かは、それぞれのケースで検討する必要がある。

温度変換日数を計算するためには、あらかじめ室内実験を行って、活性化エネルギーを求めておく必要がある。活性化エネルギーを求める方法は、各種の温度で実験を行い、それぞれの温度における速度定数を求め、後述の Arrhenius plot の勾配から求めるのが一般的である。

(1)式の両辺の対数をとると(9)式が得られる。

$$\ln k = \ln A - Ea/RT \quad (9)$$

絶対温度の逆数を横軸に、 $\ln k$ を縦軸にとって作図したものが Arrhenius plot である。Arrhenius plot の形状は、一般的には負の勾配を有する直線になる。しかし、上に凹の曲線、山型二直線、あるいは勾配ゼロまたは正の直線になる場合もあり、その解釈法は鍵谷 (1970) が詳しく論じている。

生物反応系の Arrhenius plot は、生理的零点の温度から、高温のため蛋白変性の始まる温度の範囲内で、負の勾配を有する直線になる場合と、山型二直線になる場合とが報告されている (LYONS ら, 1970; MINCHIN ら, 1973; 金野, 1976; YAMANO ら, 1983)。

本理論の適用範囲は、Arrhenius plot が直線となっている温度範囲に限られている。山型二直線になる場合は、山頂の温度を境にして、別々に活性化エネルギーを求める必要がある。

最近、著者らは上記のような Arrhenius plot を用いなくて、土壌有機物分解の活性化エネルギーを求める方法として、20, 25, 30°C の温度別分解曲線を 25°C 分解曲線に重ね合わせる方法を提案した (杉原ら, 1986)。

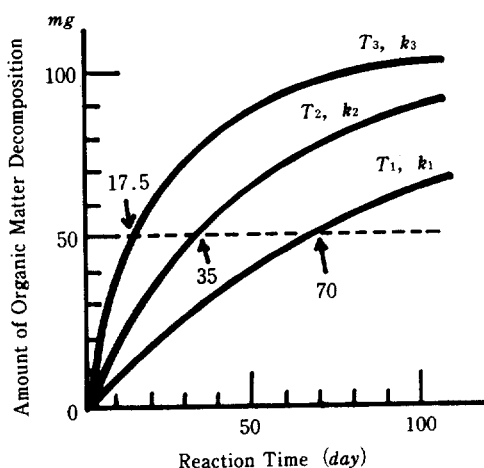


Fig. 1. Model curves of organic matter decomposition at different temperature.

Decomposition of organic matter was calculated from $N = N_0(1 - \exp(-k \cdot t))$ and parameters such as $N_0 = 100\text{mg}$, $k_1 = 0.01$, $k_2 = 0.02$, $k_3 = 0.04 \text{ day}^{-1}$.

Ⅲ 温度の異なる地域の生物活性の指標

1. 地域別の25°C 変換日数

生物活性は寒冷地で低く暖地で高いことが経験的に知られている。このような生物活性の違いを地域別に比較する指標として、25°C 変換日数は有効である。

日本の北から南にかけて、8地点を選定して、Table 3にそれぞれの地点の月平均気温、月平均地温および温度指数を示した。

月平均気温および月平均地温を用いて、地域別の1年間の25°C 変換日数を計算して Table 4、5に示した。

25°C 変換日数の算出にあたっては、各月の15日が平

均温度であるとし、翌月の15日まで直線的に温度変化するものと仮定して、日平均気温（または地温）を求めて、(3)式を用いて、1日毎の25°C 変換日数を計算し、それを加算して、夏期間と冬期間および年間の25°C 変換日数を算出した。計算には $Ea = 10,000, 15,000, 20,000 \text{ cal mol}^{-1}$ を用いた。

Table 4の気温から求めた25°C 変換日数を見ると、1年は365日あるが、その値は Ea で異なり、札幌では78~150日、函館77~151日、盛岡94~167日、水戸128~199日、広島158~202日、福岡176~235日、鹿児島200~252日、那覇298~322日の範囲にあった。このことは那覇では札幌に比して2.1~3.8倍の生物活性があることを

Table 3. Monthly mean air temperature, monthly mean soil temperature and warmth index at different locations.

Place		Jan.	Feb.	March	April	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Mean	Warmth Index
Sapporo	air	-4.9	-4.2	-0.4	6.2	12.0	15.9	20.2	21.3	16.9	10.6	4.0	-1.6	8.0	68.1
	soil	-1.8	-2.2	-0.4	5.9	12.3	17.2	21.2	22.6	18.2	11.6	4.7	2.0	8.7	74.0
Hakodate	air	-3.6	-3.2	0.4	6.4	11.4	15.1	19.3	21.2	17.2	11.3	4.9	-0.6	8.3	66.9
	soil	-0.7	-1.1	0.9	6.9	12.1	16.8	20.9	23.1	19.3	12.9	6.4	1.6	10.1	78.4
Morioka	air	-2.5	-1.8	1.6	8.3	13.9	17.9	21.8	22.8	18.0	11.6	5.6	0.4	9.8	79.9
	soil	0.2	0.0	2.2	8.5	14.3	19.2	23.3	25.2	21.0	14.7	8.1	2.7	11.6	94.3
Mito	air	2.5	3.1	6.2	11.7	16.2	19.6	23.3	24.8	21.0	15.4	10.0	4.9	13.2	103.2
	soil	2.7	3.6	7.3	12.8	18.1	22.0	25.8	27.5	23.9	17.8	11.7	5.5	14.9	122.4
Hiroshima	air	4.3	4.9	7.8	13.3	17.6	21.2	25.6	26.8	22.8	17.0	11.5	6.6	15.0	120.2
	soil	5.9	6.6	9.8	15.0	19.8	23.5	27.6	29.5	25.5	19.4	13.6	8.6	17.1	144.8
Fukuoka	air	5.7	6.4	9.3	14.2	18.4	22.0	26.7	27.3	23.4	17.8	12.7	8.1	16.0	132.0
	soil	6.8	7.3	10.4	15.0	19.6	23.1	27.1	28.6	25.2	19.6	14.4	9.5	17.2	146.6
Kagoshima	air	7.0	8.2	11.2	16.1	19.8	23.0	27.2	27.7	24.9	19.6	14.3	9.2	17.3	148.2
	soil	8.1	9.0	12.2	16.7	20.9	23.9	28.0	28.8	26.3	20.9	15.8	10.7	18.4	161.3
Naha	air	16.0	16.4	18.0	21.0	23.7	26.1	28.1	27.8	27.1	24.3	21.3	18.1	22.4	207.9
	soil	15.8	16.2	18.1	21.6	24.9	27.2	29.8	29.2	28.2	24.6	21.4	17.9	22.9	214.9

Air temperature : The mean value of 30 years from 1951 to 1980 quoted from Chronological Scientific Tables, ed. Tokyo Astronomical Observatory, Maruzen, 1985.

Soil temperature : 10cm in depth, quoted from the data on soil temperature, published from Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, and Ministry of Meteorology, 1982.

Table 4. ADTS calculated from air temperature at different locations.

Period	Ea	Sapporo	Hakodate	Morioka	Mito	Hiroshima	Fukuoka	Kagoshima	Naha
Summer (May~Oct.)	10,000cal	109	108	120	137	133	160	170	195
	15,000	86	84	98	120	141	151	165	201
	20,000	68	66	81	106	131	144	161	208
Winter (Nov.~April)	10,000	41	43	47	62	69	75	82	127
	15,000	20	22	25	37	43	49	56	107
	20,000	10	11	13	22	27	32	39	90
Annual	10,000	150	151	167	199	202	235	252	322
	15,000	106	106	123	157	184	200	221	308
	20,000	78	77	94	128	158	176	200	298

ADTS : The annual number of days transformed to standard temperature (25°C).

Ea : Apparent activation energy.

Table 5. ADTS calculated from soil temperature at different locations.

Period	Ea	Sapporo	Hakodate	Morioka	Mito	Hiroshima	Fukuoka	Kagoshima	Naha
Summer (May~Oct.)	10,000	116	119	134	158	175	171	180	207
	15,000	94	97	117	149	173	167	180	221
	20,000	77	80	102	141	172	164	181	236
Winter (Nov.~April)	10,000	44	48	52	66	78	80	88	127
	15,000	22	25	29	41	52	54	62	108
	20,000	11	13	16	26	35	37	44	91
Annual	10,000	160	167	186	224	253	251	268	334
	15,000	116	122	146	190	225	221	242	329
	20,000	88	93	118	167	207	201	225	327

意味している。

夏期間と冬期間の比を見ると、札幌では2.7~6.8倍、水戸では2.2~4.8倍、那覇では1.5~2.3倍で、寒地における冬期間の生物活性が非常に低い特徴がよく出ている。

Table 5 は地温から求めた25°C 変換日数で、この数値は土壌中での生物による物質変化を地域別に比較する上で有効である。例えば、25°C 恒温で土壌を培養して物質変化を調べたとする。その実験で88~160日間で起こる物質変化が札幌での1年間の変化に相当し、167~224日間で起こる物質変化が水戸での1年間の変化に相当し、約330日間で起こる物質変化が那覇での1年間の変化に相当すると考えることができる。

このように温度条件の異なる地域での生物活性の指標として25°C 変換日数は有効である。

2. 地域別の有機物年間分解率

土壌中における有機物の分解量は、有機物の分解特性値と施用される地域の温度条件等によって決まる。

自然界で生産される有機物が土壌に堆積された後にどの位の速度で分解されるかを気候区分別に知ることは、自然界のバイオマスを評価する上で必要である。また、農業用の有機物資材が一年間にどの程度分解するかを知ることが、有機物資材を活用する上で不可欠の条件である。

有機物の分解特性値として三つの指標を提案した(杉原ら, 1986)。可分解性有機物含量, 分解速度定数, 速度定数の温度係数(または活性化エネルギー)である。この三つの指標は室内実験から求めることができる。

これらの分解特性値と年間25°C 変換日数から、地域別の有機物年間分解率を求めることができる。計算式は次の通りである。

有機物分解のモデル式は

$$Y = pA(1 - \exp(-k \cdot t)) \quad (10)$$

ここで

Y : 有機物分解量 (mg/100g dry soil)

A : 有機物量 (mg/100g dry soil)

p : 有機物中の可分解性有機物含量 (%)

k : 分解速度定数 (25°C, deg⁻¹)

t : 時間 (day)

いま、1年間の分解率を R とすると

$$R = Y_y/pA = 1 - \exp(-k \cdot t_y) \quad (11)$$

ここで

Y_y : 1年間の有機物分解量

t_y : 1年間の25°C 変換日数

従って、室内実験から可分解性有機物含量 p と分解速度定数 k (25°C での) および活性化エネルギー Ea を求めると、地域別の有機物年間分解率を求めることができる。

地域別の年間分解率は k と Ea と地温データで決まるので、その計算表を作成しておくとう便利である。(11)式を用いて計算表を作成した(Attached Table 1~6)。

Attached Table の使い方は次の通りである。

有機物分解と温度との関係の研究例がないので、ここでは有機態窒素の無機化の例を挙げて述べる。

畑土壌を用いて室内培養実験をして、土壌の有機態窒素の無機化の特性値を求め、可分解性窒素量5.44 Nmg/100g 乾土、無機化速度定数 (25°C) 0.0061, 活性化エネルギー18,000が得られている(杉原ら, 1986)。

この特性値を持つ畑土壌が日本各地に分布すると仮定して、Attached Table 4 (活性化エネルギー17,500の表) から、1年間に無機化する窒素の割合は、札幌で45%、

水戸で65%, 福岡で72%, 那覇で86%という数値が得られる。このように、地域別の1年間の25°C変換日数は、それぞれの地域の生物活性を評価する上で有効である。

IV 生態気候区分と温度変換日数との関係

生態気候区は温量指数と降水量とで区分され、雨に不足のない湿潤な地方では温量指数のみで区分されている(吉良, 1948; 吉良, 1976; 吉良, 1972)。

温量指数と25°C変換日数との関係を調べるために、札幌を100として各地点の相対値を求めて Table 6 に示した。表からわかるように、活性化エネルギー $Ea = 15,000$ の25°C変換日数の相対値と温量指数の相対値とはよく一致している。そこで両数値の相関関係を調べてみると、気温から求めた数値と地温から求めた数値共に同一直線上にあることがわかった (Fig. 2)。

このことは温量指数と年間25°C変換日数とは相互に変換できることを意味している。両数値の関係式は次の通りである。

$$WI = 0.677 D - 4.03$$

(12)

ここで WI : 温量指数

D : 年間25°C変換日数

(12)式の関係を用いると、吉良の生態気候区分に対応する年間25°C変換日数を評価することができる。その結果が Table 7 に示されている。すなわち、ツンドラの年間25°C変換日数は0~28, 亜寒帯針葉樹林は28~72, 冷温帯落葉樹林は72~132, 暖温帯広葉樹林は132~272, 亜熱帯林は272~360, 熱帯林は360になる。

温量指数はいき値5°Cを用いた一種の有効積算温度

Table 6. Relative values of warmth index and ADTS at different locations.

Item		place	Sapporo	Hakodate	Morioka	Mito	Hiroshima	Fukuoka	Kagoshima	Naha
Air Temp.	Warmth Index		100	98	117	152	177	194	218	305
	$Ea = 10,000$		100	101	111	133	135	157	168	215
	ADTS		100	100	116	148	174	189	208	291
	$Ea = 20,000$		100	99	121	164	203	226	256	382
Soil Temp.	Warmth Index		100	106	127	165	196	198	218	290
	$Ea = 10,000$		100	104	116	140	158	157	168	209
	ADTS		100	105	126	163	194	191	209	284
	$Ea = 20,000$		100	106	134	190	235	228	256	372

Note: Warmth Index and ADTS were normalized using these values at Sapporo.

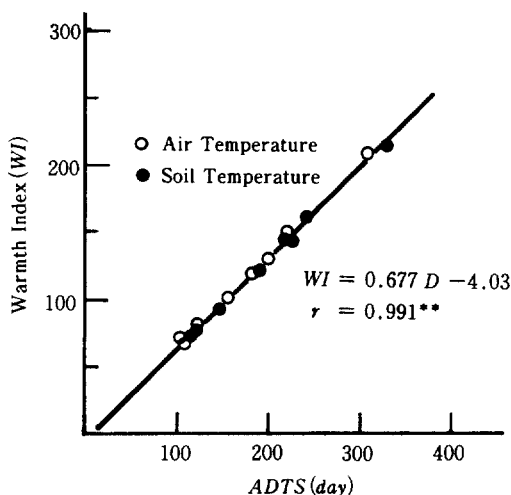


Fig.2. The relation between warmth index (WI) and ADTS (D).

である。有効積算温度の法則で用いられている生育零点 D と活性化エネルギー Ea とは相互に変換可能なことは、既に報告した (金野, 1980)。いき値5°Cを用いた温量指数と、活性化エネルギー15,000を用いた年間25°C変換日数とがよく対応することは、変換日数が植物生態学的に何らかの意味を持つことを示唆しているものと思われるが、この関係を生態物理学的または環境物理学的に明らかにするには一層の研究が必要である。

V 温度較差がある場合とない場合の25°C変換日数の差

自然状態の生物活性を予測する場合、その目的によっては予測の精度を高めなければならない場合がある。月平均温度を使用するよりは日平均温度を使用した方が精度は高まるし、更に、日最高温度、日最低温度を用いた方が精度は高い。

Table 7. Classification of plant climate and ADTS.

Plant Ecological Climate Type	Warmth Index (°C・month)	ADTS ($E_a = 15,000$)
Tundra (polar zone)	0 ~ 15	0 ~ 28
Subpolar coniferous forest	15 ~ 45	28 ~ 72
Cool temperate deciduous broad-leaved forest	45 ~ 85	72 ~ 132
Warm temperate broad-leaved forest	85 ~ 180	132 ~ 272
Subtropical forest	180 ~ 240	272 ~ 360
Tropical forest	240	360

25°C 変換日数を計算する場合に、日平均温度を用いた値は、日較差を考慮した値より低い値となる (Appendix 参照)。従って厳密には日変化を考慮して計算をする必要がある。

しかしながら、目的によっては、厳密な計算を要しない場合もあるので、その判断をするための評価表を作成して Table 8 に示した。表からわかるように、日平均温度で求めた場合と温度日変化を考慮して計算した場合の 25°C 変換日数の差は、活性化エネルギーが大きければ大きく、また、温度較差が大きければ大きくなる。その他、日平均温度が低いと 25°C 変換日数の差は若干大きくなる。

VI 有機物分解特性値と土壤温度を用いた土壤中の有機物分解量の予測法

有機物分解特性値と土壤温度とを用いて、土壤中における有機物分解量を予測する方法を考案した。

温度変換日数は自然状態の温度を標準温度に変換したものであるから、室内実験の結果から自然状態の生物活性を予測する方法のかなめになっている。

予測法は三つの部分から成っている。その第 1 は有機物分解の特性値を求める室内実験であり、第 2 は地温データと活性化エネルギーとから温度変換日数を計算する部分であり、第 3 は温度変換日数と無機化モデルから

Table 8. Difference between DTS based on daily mean data and that based on daily range data.

		(%)					
E_a	Daily Range	Daily Mean Soil Temp.					
		5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
10,000cal	5°C	0.59	0.55	0.51	0.48	0.44	0.41
	10	2.37	2.20	2.05	1.91	1.78	1.66
	15	5.36	4.98	4.63	4.31	4.02	3.75
	20	9.59	8.90	8.27	7.69	7.17	6.69
15,000cal	5	1.39	1.29	1.20	1.12	1.05	0.98
	10	5.60	5.20	4.84	4.51	4.20	3.92
	15	12.74	11.83	11.00	10.24	9.54	8.90
	20	23.04	21.36	19.84	18.44	17.17	16.01
20,000cal	5	2.52	2.35	2.19	2.04	1.90	1.78
	10	10.25	9.52	8.85	8.24	7.69	7.18
	15	23.62	21.90	20.33	18.91	17.61	16.42
	20	43.42	40.16	37.21	34.53	32.10	29.88
25,000cal	5	4.00	3.72	3.47	3.23	3.02	2.82
	10	16.41	15.23	14.16	13.18	12.28	11.46
	15	38.43	35.57	32.98	30.62	28.48	26.52
	20	72.23	66.58	61.51	56.92	52.78	49.02

Note : Daily variation in soil temperature was approximated by a sine-function.

分解量を計算する部分である。第1の有機物分解の特性値を求める方法については別に報告した(杉原ら, 1986)。本報告では予測法を総括的に述べる。

1. 有機物分解量の予測法の手順

- ① 土壤に有機物を添加して適当な土壤水分条件下で、温度20, 25, 30°Cで分解試験を実施して、温度別の分解曲線を得る。(土壤水分は飽和含水量の60%に保つのが一般的である。温度条件は既存のデータとの比較を容易にするために、20, 25, 30°Cで実施することを提案する。)
- ② 有機物の分解特性値を求めるための分解モデルを選択する。
- ③ 分解のモデル式を用いて、温度別分解曲線を25°C分解曲線に重ね合わせて、最小自乗法によってあてはめをする。すると、分解特性値を求めることができる。また、25°Cの分解モデル曲線の式も得られる。
- ④ 土壤温度のデータと、上記の方法で求められた活性化エネルギーとを用いて、1日毎の25°C変換日数を計算して、目的とする期間の積算25°C変換日数を算出する。
- ⑤ 積算25°C変換日数を25°Cの分解モデル曲線の式に代入して、目的とする期間の分解量を計算する。

上記の手順②～③はモデル式へのあてはめである。手順④は(3)式を用いる。手順⑤は手順④で得られた積算25°C変換日数と手順③で得られた25°Cの分解モデル曲線の式とを用いる。これらの計算を行い、作図するために、マイコン用プログラムを作成して使用した。

2. 予測法の適用例

東北農業試験場の畑土壌(厚層多腐植質多湿黒ボク土)の窒素無機化の特性値と51年, 53年, 54年の日平均地温(10cm)を用いて、5月1日から10月31日までの窒素の無機化量を推定して、Fig. 3に示した。

低温年の51年と高温年の53年の地温差は、7月, 8月に大きく、窒素の無機化量に差が生じた。この窒素無機化量の差は、作土深を20cmとし、仮比重を0.7と仮定すると10a当り窒素約2.5kgに相当した。

次に、下水汚泥の窒素無機化の特性値と各地域の月平均地温(10cm)とを用いて、下水汚泥が5月1日に施用された場合の窒素無機化量を推定した(Fig. 4)。

この下水汚泥の可分解性窒素量は土壌100g当り22.8mg添加されているが(10a当り22.8Nkgに相当する)、その40%が無機化する日数は、札幌19日、盛岡17日、水戸13日、鹿児島11日、那覇8日であると推定され、那覇における無機化速度は札幌の2.4倍であった。

このように、低温年と高温年の地力窒素の発現様式の差の推定、あるいは、有機質窒素肥料の地域別の肥効発現の差の推定など、圃場条件(自然条件)における有機物分解の予測や有機態窒素の無機化の予測に役立つと考えられる。

Ⅶ 要 約

自然界での生物活性は温度変化によって、時々刻々と変化している。それゆえ、生物活性と温度との関係を定量的に把握することが重要である。

Arrheniusの法則を用いて、生物活性への温度の影響を指標化する方法を検討した。さらに、その指標を有機物分解の推定に応用した。

得られた結果は次の通りである。

1. 生物活性への温度の影響を表わす指標として温度変換日数を提案した。温度変換日数は、ある温度で、ある日数おかれた条件が、標準温度に変換すると何日に相当するかを表わしている。
2. 温度変換日数の理論は次の二つの仮定にもとづいている。

- ① Arrheniusの法則が成り立つ。

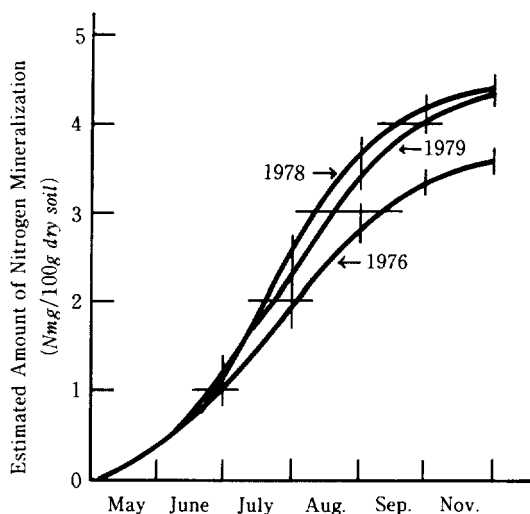


Fig. 3. Estimated mineralization of soil nitrogen compounds at Morioka (northern part of Honshu island).

Mineralization of soil nitrogen was calculated from $N = N_0 [1 - \exp(-k \cdot DTS)]$ using daily mean of soil temp. and parameters proposed by SUGIHARA (1986) ($N_0 = 9.85 \text{ Nmg/100g dry soil}$, $k = 0.0050 \text{ day}^{-1}$, $E_a = 22,000 \text{ cal mol}^{-1}$).

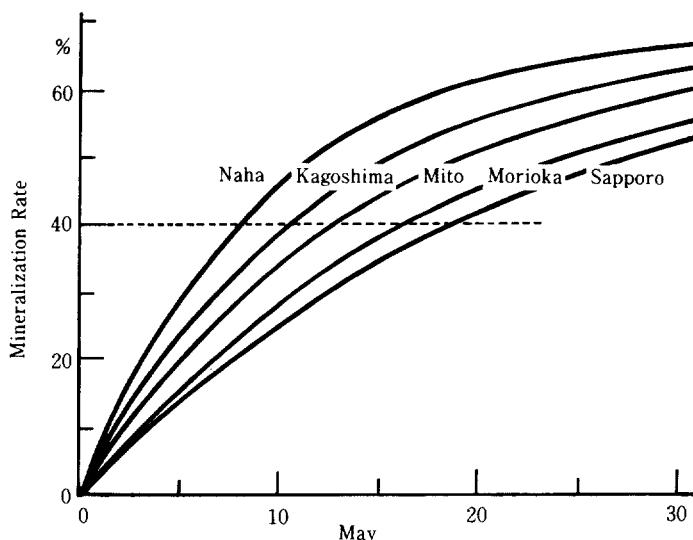


Fig 4. Estimation of mineralization of nitrogen compounds in sewage sludge applied to soil.

Assuming that sewage sludge is applied to soil on May 1st at respective locations, mineralization of nitrogen compounds was estimated from $N = N_0^1 [1 - \exp(-k_1 \cdot DTS)] + N_0^2 [1 - \exp(-k_2 \cdot DTS)]$ using daily mean data of soil temperature at these locations and parameters proposed by SUGIHARA (1986) ($N_0^1 = 13.73$, $N_0^2 = 9.10$ $Nmg/100g$ dry soil, $k_1 = 0.1358$, $k_2 = 0.0074$ day^{-1} , $Ea_1 = 11,000$, $Ea_2 = 16,300$ $cal\ mol^{-1}$)

- ② 同一反応量になるまでの日数と速度定数との積は温度にかかわらず一定である。
3. 温度の異なる地域の生物活性を比較するのに、 $25^{\circ}C$ 変換日数は有効であることが判った。気温から求めた年間 $25^{\circ}C$ 変換日数は見かけの活性化エネルギーで異なるが、札幌で78~150日、水戸で128~199日、福岡で176~235日、鹿児島で200~252日、那覇で298~322日の範囲にあった。
4. 有機物の分解特性値と年間 $25^{\circ}C$ 変換日数を用いて、地域別の年間有機物分解率を求める方程式を導き、簡易な計算表を作成した。
5. 植物生態気候区分に使用されている温量指数 (WI) と年間 $25^{\circ}C$ 変換日数 (D) とがよく対応することを見出し、両者の間に下記の関係式が得られた。

$$WI = 0.677D - 4.03$$

この関係を用いると、各植物生態気候区に対応する D の値を容易に評価できる。

6. $25^{\circ}C$ 変換日数を計算する際に、日平均温度を用いた値は、日較差を考慮した値より低くなることがわかった。日平均地温、地温日較差および活性化エネルギーから $25^{\circ}C$ 変換日数の補正値を求める計算表を作

成した。

7. 有機物分解特性値と土壤温度とを用いて、土壤中における有機物分解量を予測する方法を提案した。

予測法の手順は次の通りである。

室内実験から得られる 20 , 25 , $30^{\circ}C$ の有機物分解曲線を解析して、分解モデル式と3つの分解特性値を求める。次に土壤温度と活性化エネルギーを用いて目的とする期間の積算 $25^{\circ}C$ 変換日数を計算し、これと分解モデル式から圃場の有機物分解量を推定する。

8. 土壤中の窒素無機化に予測法を適用した。

東北農試における昭和51, 53, 54年の日平均地温を用いて、5月1日から10月31日までの土壤窒素の無機化量を上記の方法から推定した。その結果、高温年と低温年の土壤窒素無機化量の差は10a 当り約 $2.5N\ kg$ になることがわかった。

下水汚泥を5月に施用した場合の窒素無機化量を札幌、盛岡、水戸、鹿児島、那覇の地温データと上記予測法を用いて推定した。その結果、那覇における窒素無機化速度は札幌の2.4倍になることがわかった。

謝 辞

本研究の実施に当っては、元東北農業試験場出井嘉光場長（現佐賀大学教授）、元東北農業試験場環境部木下彰部長、元農業環境技術研究所資材動態部肥料動態科山添文雄科長および農業研究センター土壌肥料部土壌改良研究室石井和夫室長の助言と激励を賜りました。

また、九州農業試験場環境第1部農業気象研究室清野豁技官および東北農業試験場環境部農業気象研究室谷口利策室長からは貴重な地温データの提供を受けました。

本報告のとりまとめにあたり農業環境技術研究所環境資源部気象管理科内嶋善兵衛科長の指導と助言を賜りました。

上記の方々に対して深く感謝致します。

引用文献

- 1) ADDISCOTT, T.M. (1983) : Kinetics and temperature relationships of mineralization and nitrification in Rothamsted soils with differing histories. *J. of Soil Sci.*, **34**, 343-353.
- 2) BASKERVILLE, G.L. and P.EMIN (1969) : Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology*, **50**, 514-517.
- 3) CAMPBELL, C.A., Y.W. JAME, and G.E.WINKLEMAN (1984) : Mineralization rate constants and their use for estimating nitrogen mineralization in some canadian prairie soils. *Can. J. Soil Sci.*, **64**, 333-343.
- 4) HARPER, S.H.T. and J.M.LYNCH (1981) : The kinetics of straw decomposition in relation to its potential to produce the phytotoxin acetic acid. *J. of Soil Sci.*, **32**, 627-637.
- 5) 広海啓太郎・菅 宏訳 (1977) : 生物熱力学の分野における国際的活動(Ⅱ)―生化学における平衡データの測定および表示に関する推奨 (上). 生物熱力学合同委員会, 熱測定, **4**, 172-176.
- 6) HUNT, H.W. (1977) : A simulation model for decomposition in grassland. *Ecology*, **58**, 469-484.
- 7) JENKINSON, D.S. (1977) : Studies on the decomposition of plant material in soil. V. The effects of plant cover and soil type on the loss of carbon from ^{14}C labelled ryegrass decomposing under field conditions. *J. of Soil Sci.*, **28**, 424-434.
- 8) 鍵谷 勤 (1970) : 化学反応の速度論的研究法 上巻, p. 11, 化学同人, 京都.
- 9) 吉良龍夫 (1948) : 高冷地の利用に対する気候学的な基礎について. 生理生態, **2**, 50-56.
- 10) 吉良竜夫 (1976) : 陸上生態系―概論― (生態学講座 2), p. 43, 共立出版株式会社, 東京.
- 11) 吉良竜夫 (1972) : 生態学からみた自然. 改訂5版, p. 150, 河出書房新社, 東京.
- 12) 金野隆光 (1976) : 種子発芽速度と地温. 北海道農試研究資料, **8**, 43-58.
- 13) 金野隆光 (1980) : 土壌中の生物活性と温度. 土壌の物理性, **41**, 7-16.
- 14) 是永龍二・坂神泰輔・駒崎進吉 (1980) : ヤノネカイガラムシの発育と温度との関係. Ⅲ 第2世代の発育速度に及ぼす温度の影響. 果樹試報, **B7**, 99-108.
- 15) LYONS, J.M. and J.K.RAISON (1970) : Oxidative activity of mitochondria isolated from plant tissues sensitive and resistant to chilling injury. *Plant Physiol.*, **45**, 386-389.
- 16) MINCHIN, A. and E.W.SIMON (1973) : Chilling injury in cucumber leaves in relation to temperature. *J. Exp. Bot.*, **24**, 1231-1235.
- 17) MURAYAMA, S. (1984) : Decomposition kinetics of straw saccharides and synthesis of microbial saccharides under field conditions. *J. of Soil Sci.*, **35**, 231-242.
- 18) NUSKE, A. and J.RICHTER (1981) : N-mineralization in loess-parabrownearthes : Incubation experiments. *Plant and Soil*, **59**, 237-247.
- 19) 奥代重敬・是永龍二・坂神泰輔 (1975) : ヤノネカイガラムシの越冬末期における卵巣発育と温度との関係. 果樹試報, **B2**, 97-106.
- 20) 小野宗三郎編著 (1975) : 入門酵素反応速度論. p. 33, 共立出版株式会社, 東京.
- 21) RICHTER, J., A.NUSKE, W.HABENICHT and J.BAUER (1982) : Optimized N-mineralization parameters of loess soils from incubation experiments. *Plant and Soil*, **68**, 379-388.
- 22) 坂神泰輔・是永龍二 (1981) : 有効積算温度の簡易な新算法“三角法”について. 応動昆, **25**, 52-54.
- 23) SMITH, G.D. 著・小山正忠訳 (1967) : 包括的土壌分類体系 (補遺 2). 農業技術研究所資料, **B11**, p. 135, p. 137.
- 24) STANFORD, G. and S.J.SMITH (1972) : Nitrogen mineralization potential of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **36**, 465-472.
- 25) STANFORD, G., M.H.FREIRE and D.H.SCHWANINGER (1973)

- : Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. *Soil Sci.*, **115**, 321–323.
- 26) 杉原 進・金野隆光・石井和夫 (1986)：土壤中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法. *農環研報*, **1**, 127–166
- 27) TABATABAI, M.A. and A.A.AL-KHAFAJI (1980)：Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 1000–1006.
- 28) 内嶋善兵衛 (1981)：ソ連・東欧の農業気候. *国際農林業協力*, **4**, 8–26.
- 29) VAN VEEN, J.A. and E.A.PAUL (1981)：Organic carbon dynamics in grassland soils. 1. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.*, **61**, 185–201.
- 30) WATANABE, N. (1978)：An improved method for computing heat accumulation from daily maximum and minimum temperatures. *Appl. Entomol. Zool.*, **13**, 44–46.
- 31) WESTERMANN, D.T. and S.E.CROTHERS (1980)：Measuring soil nitrogen mineralization under field conditions. *Agron. J.*, **72**, 1009–1012.
- 32) 山辺 茂 (1968)：入門生体熱力学. p. 79, 南江堂, 東京.
- 33) YAMANO, H. and K.TAKAHASHI (1983)：Temperature effect on the activity of soil microbes measured from heat evolution during the degradation of several carbon sources. *Agric. Biol. Chem.*, **47**, 1493–1499.
- 34) 安田 誠 (1982)：ミカンハダニの生活史パラメータに対する温度の影響. *応動昆*, **26**, 52–57.
- 35) 吉野 喬・出井嘉光 (1977)：土壤窒素供給力の有効積算温度による推定法について. *農事試研報*, **25**, 1–62.

Temperature Index for Characterizing Biological Activity in Soil and Its Application to Decomposition of Soil Organic Matter

Takamitsu KONNO* and Susumu SUGIHARA*

Summary

Arrhenius' law for chemical reaction was applied to derive a temperature index for characterizing biological activity in soil. The temperature index so obtained was used to study the decomposition of soil organic matter in relation to soil climate. The results obtained through investigations can be summarized as follows.

1. Temperature index (DTS) for biological activity in soil was derived from the following two assumptions.

- ① Biological activity in soil obeys Arrhenius' law.
- ② Product of rate constant and reaction time is constant for a certain amount of reaction independent of temperature.

Temperature index (DTS) indicates the number of days needed for proceeding of a certain chemical reaction under temperature conditions of 25°C. It was found that temperature index obtained at different temperatures can be easily transformed into DTS.

2. Annual values of DTS (ADTS) calculated from weather data in Japan were successfully used to evaluate quantitatively the strength of biological activity in soil at different regions with various climates. ADTS obtained using air temperature changed over a range from 78-150 days at Sapporo to 298-322 days at Naha, as shown in Table 4.
3. ADTS at different regions and experimental data of decomposition characteristics of soil organic matter (rate of easily decomposable part in soil organic matter, decomposition rate of soil organic matter and apparent activation energy) were used to evaluate the annual decomposition rate of soil organic matter in respective regions of Japan. The result are tabulated in the attached Tables 1 - 6.
4. It was found that ADTS can be transformed into warmth index (WI) that is an important climatic index in plant ecology, by using the following relation.

$$WI = 0.677(ADTS) - 4.03$$

This means that ADTS can be easily obtained from the data of WI and that ADTS can be also used for the classification and comparison of plant climate.

5. Comparison of DTS calculated using daily mean temperature data and daily range data of temperature shows that DTS based on daily mean data is somewhat lower than that based on daily range data. The difference between the two DTS-values increased with increment in the daily range of temperature variation and in apparent activation energy, as shown in Table 8.

*National Institute of Agro-Environmental Sciences, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki, 305 JAPAN

6. The method for estimating the decomposition of organic matter in soil was proposed. Using soil temperature data and the proposed method, the mineralization of organic nitrogen compound for the period May 1st to Oct. 31th was estimated in three years (1976, 1978 and 1979) with different weather conditions at Morioka (northern part of Honshu island). The results indicated that N-mineralization in the 1978 with higher summer temperature is larger at 2.5kgN/10a than in the 1976 with lower summer temperature. This method was also used to estimate the mineralization speed of nitrogen compound in sewage sludge applied to soil. It was concluded from calculations that the mineralization speed at Naha (Okinawa prefecture) is 2.4 times as large as that at Sapporo (Hokkaido).

Appendix

温度の日較差を考慮しないと25°C変換日数が低い値になる理由は次の通りである。

下図に示したように単純な系すなわち最高温度 T_3 が12時間、最低温度 T_1 が12時間の1日を考えてみる。

速度定数の比をとると、(1)式から

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

$$k_3/k_2 = \exp(Ea \cdot \Delta T / RT_2 T_3)$$

$K = Ea/RT_1 T_2 \cong Ea/RT_2 T_3$ において、上式をテーラー展開すると下の関係式が得られる。

$$k_1 = k_2 (1 - K \cdot \Delta T + (K \cdot \Delta T)^2/2! - (K \cdot \Delta T)^3/3! + (K \cdot \Delta T)^4/4! - \dots)$$

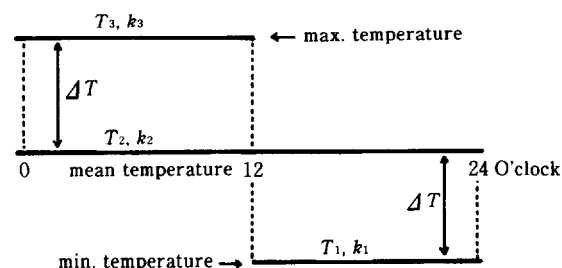
$$k_3 = k_2 (1 + K \cdot \Delta T + (K \cdot \Delta T)^2/2! + (K \cdot \Delta T)^3/3! + (K \cdot \Delta T)^4/4! + \dots)$$

すると、 k_1 と k_3 の平均値は次のようになる。

$$(k_1 + k_3)/2 = k_2 (1 + (K \cdot \Delta T)^2/2! + (K \cdot \Delta T)^4/4! + \dots)$$

それゆえ $(k_1 + k_3)/2 > k_2$ となる。

つまり平均温度から求めた k_2 は k_1 と k_3 の平均値より小さい。(3)式において k と k_s の比が変換係数であるが、平均温度を使うと k を小さく見積ってしまうので、25°C変換日数が低い値となる。



Attached Fig. 1. Model scheme assuming that max. temperature continues for half a day, and min. temperature continues for the other half.

k_1, k_2, k_3 ; Rate constant

T_1, T_2, T_3 ; Temperature

$2 \cdot \Delta T$; Dairy range of temperature

Attached Table 1. Annual decomposition rate of organic matter at different locations
($E_a = 10,000 \text{ cal mol}^{-1}$).

	(%)							
k (25°C)	Sapporo	Hakodate	Morioka	Mito	Hiroshima	Fukuoka	Kagoshima	Naha
0.020	96	96	98	99	99	99	100	100
0.016	92	93	95	97	98	98	99	100
0.014	89	90	93	96	97	97	98	99
0.012	85	87	89	93	95	95	96	98
0.010	80	81	84	89	92	92	93	96
0.009	76	78	81	87	90	90	91	95
0.008	72	74	77	83	87	87	88	93
0.007	67	69	73	79	83	83	85	90
0.006	62	63	67	74	78	78	80	87
0.005	55	57	61	67	72	71	74	81
0.004	47	49	52	59	64	63	66	74
0.003	38	39	43	49	53	53	55	63
0.002	27	28	31	36	40	39	41	49
0.001	15	15	17	20	22	22	24	28
ADTS	160	167	186	224	253	251	268	334

Attached Table 2. Annual decomposition rate of organic matter at different locations
($E_a = 12,500 \text{ cal mol}^{-1}$).

	(%)							
k (25°C)	Sapporo	Hakodate	Morioka	Mito	Hiroshima	Fukuoka	Kagoshima	Naha
0.024	96	97	98	99	100	100	100	100
0.020	93	94	96	98	99	99	99	100
0.016	91	92	95	98	99	99	99	100
0.014	88	90	93	96	98	98	98	99
0.012	80	82	86	91	94	94	95	98
0.010	74	76	81	87	91	90	92	96
0.009	70	72	77	84	88	88	90	95
0.008	66	68	73	81	85	85	87	93
0.007	61	63	68	76	81	81	83	90
0.006	56	57	63	71	76	76	78	86
0.005	49	51	56	64	69	69	72	81
0.004	42	43	48	56	61	61	64	73
0.003	33	35	39	46	51	51	53	63
0.002	24	25	28	34	38	37	40	48
0.001	13	13	15	19	21	21	22	28
ADTS	135	142	164	205	236	235	254	331

Attached Table 3. Annual decomposition rate of organic matter at different locations
($E_a = 15,000 \text{ cal mol}^{-1}$).

	(%)							
k (25°C)	Sapporo	Hakodate	Morioka	Mito	Hiroshima	Fukuoka	Kagoshima	Naha
0.026	95	96	98	99	100	100	100	100
0.020	90	91	95	98	99	99	99	100
0.018	88	89	93	97	98	98	99	100
0.016	84	86	90	95	97	97	98	99
0.014	80	82	87	93	96	95	97	99
0.012	75	77	83	90	93	93	95	98
0.010	69	70	77	85	89	89	91	96
0.009	65	67	73	82	87	86	89	95
0.008	60	62	69	78	83	83	86	93
0.007	56	57	64	74	79	79	82	90
0.006	50	52	58	68	74	73	77	86
0.005	44	46	52	61	68	67	70	81
0.004	37	39	44	53	59	59	62	73
0.003	29	31	35	43	49	48	52	63
0.002	21	22	25	32	36	36	38	48
0.001	11	11	14	17	20	20	21	28
ADTS	116	122	146	190	225	221	242	329

Attached Table 4. Annual decomposition rate of organic matter at different locations
($E_a = 17,500 \text{ cal mol}^{-1}$).

	(%)							
k (25°C)	Sapporo	Hakodate	Morioka	Mito	Hiroshima	Fukuoka	Kagoshima	Naha
0.030	95	96	98	100	100	100	100	100
0.024	91	92	96	99	99	99	100	100
0.020	87	88	93	97	99	99	99	100
0.018	84	85	90	96	98	98	99	100
0.016	80	82	88	94	97	97	98	99
0.014	76	77	84	92	95	95	96	99
0.012	70	72	79	88	92	92	94	98
0.010	64	65	73	83	88	88	90	96
0.009	60	61	69	80	85	85	88	95
0.008	55	57	65	76	82	82	85	93
0.007	51	52	60	71	78	77	81	90
0.006	45	47	54	65	72	72	75	86
0.005	40	41	48	59	66	65	69	81
0.004	33	35	41	51	58	57	61	73
0.003	26	27	32	41	47	47	50	63
0.002	18	19	23	30	35	34	37	48
0.001	10	10	12	16	19	19	21	28
ADTS	101	106	130	177	214	211	234	327

Attached Table 5. Annual decomposition rate of organic matter at different locations
($E_a = 20,000 \text{ cal mol}^{-1}$).

k (25°C)	Sapporo	Hakodate	Morioka	Mito	Hiroshima	Fukuoka	Kagoshima	Naha
0.034	95	96	98	100	100	100	100	100
0.030	93	94	97	99	100	100	100	100
0.024	88	89	94	98	99	99	100	100
0.020	83	84	91	96	98	98	99	100
0.018	79	81	88	95	98	97	98	100
0.016	76	77	85	93	96	96	97	99
0.014	71	73	81	90	94	94	96	99
0.012	65	67	76	87	92	91	93	98
0.010	59	61	69	81	87	87	89	96
0.009	55	57	65	78	84	84	87	95
0.008	51	52	61	74	81	80	83	93
0.007	46	48	56	69	77	76	79	90
0.006	41	43	51	63	71	70	74	86
0.005	36	37	45	57	64	63	68	81
0.004	30	31	38	49	56	55	59	73
0.003	23	24	30	39	46	45	49	63
0.002	16	17	21	28	34	33	36	48
0.001	8	9	11	15	19	18	20	28
ADTS	88	93	118	167	207	201	225	327

Attached Table 6. Annual decomposition rate of organic matter at different locations
($E_a = 22,500 \text{ cal mol}^{-1}$).

k (25°C)	Sapporo	Hakodate	Morioka	Mito	Hiroshima	Fukuoka	Kogoshima	Naha
0.038	95	96	98	100	100	100	100	100
0.030	90	92	96	99	100	100	100	100
0.024	85	86	93	98	99	99	99	100
0.020	79	81	88	96	98	98	99	100
0.018	75	78	86	94	97	97	98	100
0.016	71	73	82	92	96	96	97	99
0.014	66	69	78	89	94	93	95	99
0.012	61	63	73	85	91	90	93	98
0.010	54	56	66	79	87	86	89	96
0.009	50	53	62	76	84	83	86	95
0.008	46	49	58	72	80	79	83	93
0.007	42	44	53	67	76	74	79	90
0.006	37	39	48	61	70	69	73	86
0.005	32	34	42	55	63	62	67	81
0.004	27	28	35	47	55	54	59	73
0.003	21	22	28	38	45	44	48	63
0.002	14	15	19	27	33	32	36	48
0.001	8	8	10	15	18	18	20	28
ADTS	78	83	108	158	201	195	220	328