

27. 微生物作用が地球温暖化に及ぼす影響の温度依存性に関する研究

STUDY ON THE INFLUENCE WHICH MICROBE DOSE TO GLOBAL WARMING IN THE TEMPERATURE DEPRNDENCE

奈良 松範*

Matsunori NARA*

ABSTRACT ; Since the influence methane affects global warming matches by about 20 times (warming coefficient) the carbon dioxide, we consider more the influence by the methane generated from a nature. Especially the point that the quantity of the methane generated from the organic matter accumulated in soil or underwater by warming increases must attract attention from a viewpoint of warming prevention. However, the present condition is that impact evaluation which the greenhouse gases which occur from a plant or a microbe system give to global warming is not fully carried out. In this research, while carbon dioxide and methane examined the mechanism discharged from a nature, the experiment concerning the anaerobic fermentation of the laboratory scale about the increase in the amount of generating of the carbon dioxide by an environmental rise in heat and methane was conducted. The environmental impact by the gas which occurs from a nature was quantified by performing the impact evaluation simulation exerted on global warming using this experimental result.

KEYWORDS ; Global warning, Greenhouse gases, Anaerobic digestion, Simulation

1. はじめに

地球温暖化にともない植物の量が増加することが考えられる。植物は、二酸化炭素と水から有機物を作り出すが、ここで合成された有機物は代謝により落ち葉等となり土壌に戻される。土壌に還元された有機物は微生物により分解され、最終的には水および二酸化炭素、水、メタン、窒素、あるいは水素等のガスになる。この微生物による分解作用では、好気性環境においては二酸化炭素等が発生し、嫌気性環境においてはメタンガス等が発生する。また、植物量の増加は生態系の連鎖により、連鎖している他の生物体量の増加を招来し、これらが腐敗分解される時にもガスが発生する。森林土壌以外にも、二酸化炭素およびメタンガスの発生は、水田や湿地帯などの自然系からも認められる。また、地球温暖化により環境温度が上昇することにより土壌における好気性分解および嫌気性分解の速度が上昇し、ガスの発生量が増大することも大きな問題である。ちなみに、メタンガスが地球温暖化に及ぼす影響は二酸化炭素の約 20 倍（温暖化係数）に匹敵することから、土壌あるいは水中に蓄積した有機物から発生するメタンガスの増加は温暖化防止の観点から注目しなければならない。このように植物－微生物システムから発生する温暖化ガスは地球温暖化に影響を与えているにもかかわらず、その影響評価が十分にされていないのが現状である。特に、地球温暖化による温度上昇による二酸化炭素の吸収量増加と合成される有機物量の増大による二酸化炭素およびメタンガスの増加との間に存在する温暖化ガスの変動に関するダイナミックスについての知見は少ない。

諏訪東京理科大学システム工学部

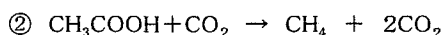
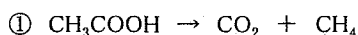
Tokyo University of Science, Suwa

本研究では、自然界から発生される二酸化炭素およびメタンガスのメカニズムについて検討した後、環境の温度上昇による二酸化炭素およびメタンガスの増加に関する実験を行った結果を用いて地球温暖化に及ぼす影響評価シミュレーションを行った。また、寒冷地において、低温のために多量の未分解有機物が残存していることにより生じる潜在的なリスクについても検討を加えた。

2. 方 法

嫌気性微生物（Methanobacterium, Methanococcus, Methanosarcina など）によるメタンガスの発生、すなわち有機物の分解は2段階で行われる。一つは、有機酸生成期であり、もう一つはメタン発酵期である。また、ほとんどの水域には周辺環境より有機物が流入していることから、嫌気性微生物の利用する基質は十分な量が存在するものとする。嫌気性分解は温度領域により、中温領域（10℃～42℃；最適温度 30～37℃）および高温領域（42℃～60℃；最適温度 50～55℃）の2つに分類されるが、本文では、自然の状態で高温領域にある事例は少ないものと判断し、高温領域については検討を行わない。さて、微生物による有機物の分解速度あるいは分解量は、微生物活性に依存していると考えることができる。水域に流入する有機物組成はきわめて変化に富んでおり、一概に特定することはできないが、都市排水にかかる有機物組成で代用すれば、生成される有機酸は、表1のような割合である。

酢酸の場合のメタンガス生成反応；



① 式の場合、メタンガスの発生量は以下のように計算される。

$\text{CH}_3\text{COOH}=60\text{g}$ 、 $\text{CO}_2=44\text{g}$ 、 $\text{CH}_4=16\text{g}$ より、酢酸1gから二酸化炭素 0.733g およびメタンガス 0.267gが生成されることがわかる（ただし、これは標準状態における値である）。

表1．生成有機酸の組成

生成物	示性式	割合	ガス発生量(ml/g)
酪酸	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}$	5%	815
プロピオン酸	$\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$	25%	991
酢酸	CH_3COOH	70%	1,111

注；ガス発生量は25℃、760mmHgの状態における値である

また、通常の嫌気性処理で発生する消化ガスは、基質が炭水化物である場合、炭水化物1gあたり 790mlであり、メタンガスと二酸化炭素の含有率は、それぞれ 50%および 50%であるとされている¹⁾。

従来、嫌気性処理の対象とされてきた有機物は下水汚泥が多く、有機物負荷はBODで数千mg/lを超えるケースが多い。しかしながら、本文で対象としている水域（湖沼、湿地など）における有機物負荷は数百～千mg/l程度である。そこで本研究では、中程度の有機物濃度（ 10^2mg/l スケール）の水域を対象として、嫌気性微生物が発生するメタンガスの発生量に関するモデル規模実験を行い、温度上昇による地球温暖化への影響評価を行った。実験に用いた嫌気性発酵装置の概容を図1に示した。培養瓶の容積は5リットルであるが、有効容積は4リットルとして毎日2回（12時間ごと）攪拌を行うと同時にフィーディングを行うことにより、半連続処理を行った。実験の温度条件は、℃、℃、℃の3段階、発

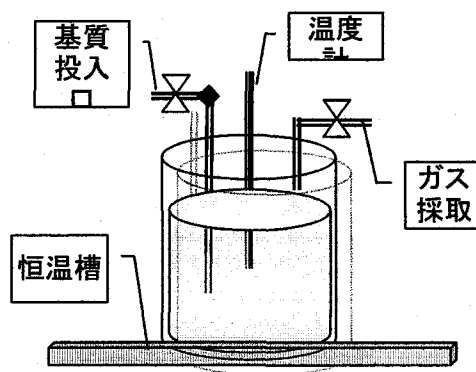


図1. 嫌気性発酵装置のイメージ図(半連続処理)

酵時間は4週間として実験を行った。ガスの発生量は、毎日1回測定し、1回のシリーズ実験終了後にガスの成分分析を行った。

3. 結果および考察

3. 1. 嫌気性微生物による温暖化ガスの発生量把握実験

微生物の活動により発生するメタンガスは、その発生量が温度により大きく影響される。一般に生化学反応の温度依存性は、ファンツ・ホフ (van't Hoff) の法則に従うとされており、これはある限定された温度範囲内で、10℃の温度上昇に対応して反応速度が2倍になるというものである。嫌気性微生物は好気性微生物よりも温度の影響を直接受けやすいことが指摘されており、好気性微生物は曝気時間、単位時間単位体積当たりの酸素要求量および酸素溶解度の3つに因子により複雑な影響を受ける。

反応速度と基質濃度との関係は、以下に示すミカエリス-メンテン (Michaelis-Menten) の式で表すことができる。

$$v = \frac{K_s \times S}{K_m + S} \quad \dots (1)$$

ここで、 v : 反応速度

K_s : 飽和定数

K_m : ミカエリスメンテン定数 (最大増殖速度の 1/2 における基質濃度)

S : 基質濃度

環境温度 25℃における有機性廃水の嫌気性処理実験の結果を表2に示した。基質は十分に存在すると仮定した。 K_s および K_m の値は、 $1/S$ および $1/v$ との関係を示す Lineweber-Burk Plot を行うことにより、得ることができる。図2は表2の結果に対する Lineweber-Burk Plot を示したものである。

表2. 嫌気性廃水処理結果(25℃)

S BODmg/l	v VSSg/VSSgday	Gas l/VSSgday
39	0.0022	5
23.6	0.0018	9
14.8	0.00108	10
10	0.0009	13

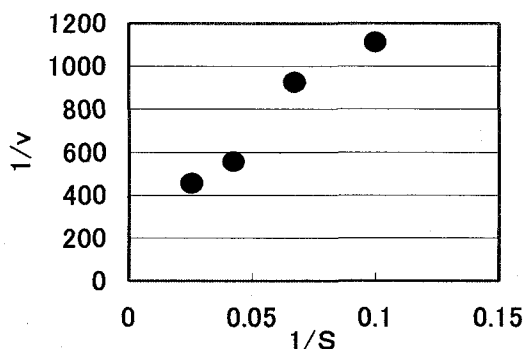


図2. 嫌気性処理における酵素反応の Lineweber-Burk Plot

計算結果より、飽和定数 K_s およびミカエリスメンテン定数 K_m は、それぞれ 0.0047 (VSSg/VSSg/day) および 44.4 (mg·day/l) であった。 K_m の値は、最大増殖速度が 1/2 である点における気質濃度であることから、(1) 式で増殖速度が飽和する値の 1/2、すなわち嫌気性微生物の対数増殖期の代表値であると考えられる。基質濃度の観点から、 K_m は 25℃の環境温度において最もガス発生量が多くなる条件であると推定される。同様に、環境温度 10℃および 20℃において有機性廃水を用いた嫌気性処理実験を行った結果を図3および表3に示した。

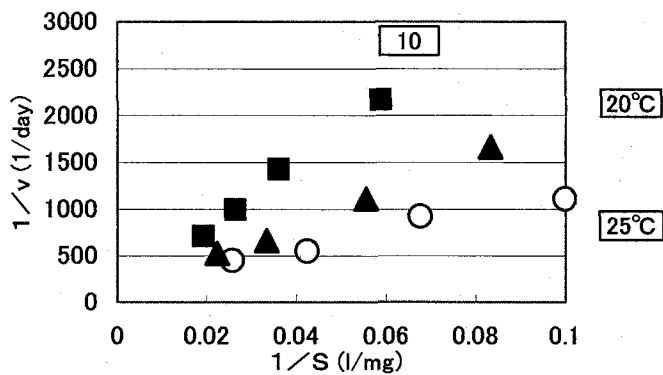


表3. 環境温度と反応速度定数との関係

環境温度(°C)	Ks	Km
25	0.0047	44
20	0.0146	277
10	0.0325	1192

図3. 各環境温度における Lineweaver Burk Plot

同じ濃度 (BOD 70mg/L) の基質を与えた場合、10℃、20℃および25℃の比増殖速度は、それぞれ $v_{10} = 0.00180(1/\text{day})$, $v_{20} = 0.00294(1/\text{day})$, および $v_{25} = 0.00290(1/\text{day})$ が得られた。温度20℃における比増殖速度は10度における値の1.63倍となっており、10度の温度差により63%の反応速度の増加が認められた。理論的には、10度の温度上昇により、反応速度は2倍となることが知られているが、実際には2倍になることは極めて希であることから勘案して、本実験の結果は妥当な値であると考えられた。また、温度20℃における比増殖速度の値と25℃における値とはほとんど同じ数値となっており、20℃以上の温度領域においては温度上昇の効果が小さくなるために5℃の温度上昇では変化が顕在化しなかったものと考えられる。しかしながら、反応速度定数においては温度差による影響が認められることから、温度効果の存在は否定できない。

温度と反応速度の関係は、アレニウス (Arrhenius) の式で定義される活性化エネルギーを利用して表現することができる。

$$k = e^{\frac{E}{RT} + C} \quad \dots (2)$$

ここで、K：反応速度定数

R：気体定数

E：反応の促進熱量

C：定数

(2) 式の $-E/RT = A$ とおき、 T_1 および T_2 における K をそれぞれ K_1 , K_2 とすれば、

$$\ln k_2 - \ln k_1 = A \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad \dots (3)$$

また、 $A = \mu / 2$ として、(3) 式を変形すると、

$$\mu = 4.61 \frac{\log k_2 - \log k_1}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad \dots (4)$$

μ は反応における活性化エネルギー (energy of activation) を示しており、その数値は反応の種類によって一定の値をとる。ここで、環境温度10℃および20℃における反応速度定数を、すでに求めた、比増殖速度 v_{10} , v_{20} , および v_{25} に等しいとすれば、(4) 式より活性化エネルギー μ を求めることができる。温度10℃

から 20℃の範囲における活性化エネルギーを計算した結果を表 4 に示した。

また、温度がメタンガス発生量に及ぼす影響を表すためのもう一つの指標として、温度係数がある。

$$k_{T_2} = k_{T_1} \times \theta^{T_1 - T_2} \quad \dots (5)$$

ここで、 k_{T_1} 、 k_{T_2} ：それぞれ温度 T_1 および T_2 における反応速度定数

θ ：温度係数 (temperature coefficient)

$$\log \theta = \frac{\log k_{T_2} - \log k_{T_1}}{T_1 - T_2} \quad \dots (6)$$

したがって、(1) 式で求めた比増殖速度 v を各環境温度における反応速度定数として計算することにより、温度係数を得ることができる。反応速度に関する温度係数を算出した結果を表 4 に示した。

表 4. 温度 10℃ および 20℃ における各係

活性化エネルギー	0.049
温度係数	1.119

3. 2. 温度上昇による微生物由来の温暖化ガス増加量

地球温暖化により年間の平均気温が、10℃から 15℃に上昇したと仮定した場合、温度変化と嫌気性発酵速度との関係について (6) 式で求めた温度係数を用いることにより、年間に発生するメタンガスおよび二酸化炭素ガスの増加量を推定することができる。

$$\begin{aligned} k_{15} &= k_{10} \theta^{10 - 15} \\ &= 1.119^{-5} = 0.57 \end{aligned}$$

流入 BOD 濃度を 120mg/l、滞留時間 24 時間とすれば、

$$A = \frac{Ce}{Co} = \frac{1}{1 + 2.3kt}$$

より、

① 15℃の場合、 $A = 0.303$

② 10℃の場合、 $A = 0.433$

となる。このことから、基質の利用量が増加した割合に比例してガス発生量が増加するとすれば、環境温度が 10℃から 15℃へ 5℃上昇することによりガスの発生量は約 43%増加することがわかる。

地球温暖化ハンドブック (IPC) によれば、二酸化炭素増加量は、化石燃料由来が年間 50 億トン、陸上のバイオマス由来が 16 億トン、海洋由来が -39 億トンであるとされている。化石燃料由来の二酸化炭素は排出するだけであるが、陸上のバイオマスから 366 億トン排出する一方で 350 億トン吸収するため、その差分 16 億トンが大気中に蓄積される。また、海洋由来の二酸化炭素は、排出量が 1000 億トンであるが、吸収量が 1039 億トンで 39 億トン分吸収量が排出量を上回る。この計算では、毎年 27 億トンが大気中に残留することになる。他方、メタンガスについては、湿地から 1.15 億トン、シロアリから 0.2 億トン、海洋から 0.1 億トン、反芻動物から 0.85 億トン、水田から 0.6 億トンなどが自然・生物由来であり、合計は 4.75 億トンとなる。化石燃料由来のメタンガスは合計で 0.85 億トンである。メタンガスは、平均寿命が 9.4 年とされており、対流圏、成層圏そして土壌中で 5.15 億トン消滅することから、差し引き 0.37 億トンが毎年蓄積されることになる。ここで、二酸化炭素の増加原因 (吸収あり) の 76% が産業由来であるのに対して、産業由来のメタンガス排出 (吸収なし、消滅) は 19% であり、排出源の 81% が自然・生物由来である。ただし、人為起源の廃棄物も生物分解されることによりメタンガスが発生する場合には、自然・生物由来と分類した。

嫌気性発酵により発生するメタンガスおよび二酸化炭素の比は、平均して 65 : 35 の割合であるとする。すでに

求めた温暖化による嫌気性消化ガス発生量の増加にかかる計算結果を利用して、メタンガスおよび二酸化炭素の増加量ならびにその増加量が年間の温暖化ガス発生量に占める割合を算定し、その結果を表5に示した。ただし、この結果はガス発生量の絶対値を明らかにするものではなく、相対比較を行ったものである。

表5. 温暖化ガスの増加量とそれが温暖化ガス発生量に占める割合

二酸化炭素増加量	二酸化炭素増加量が年間CO ₂ 発生量に占める割合(%)	メタンガス増加量(自然、水田、埋立て)	メタンガス増加量が年間メタンガス発生量に占める割合(%)
6.88億ton	0.10%	1.118億ton	21%

また、現在得られている温暖化ガスの排出量は活動可能温度の環境中に存在する微生物の値だけであり、低温のために現在活動を停止している微生物が温度上昇により温暖化ガスを放出することは考慮されていない。ここで、現在、0℃から10℃の温度範囲にある湿地は環境温度が10℃上昇することにより、新たに温暖化ガスの排出源となると考えることができる。単純に、シベリアの湿地がこの条件に適合すると仮定すれば、シベリアの湿地面積は約 $1.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ であるから、単位面積あたりのガス発生量を $0.14 \text{ CH}_4\text{g/m}^2/\text{day}$ とすれば²⁾、年間25.2万トンの温暖化ガスが追加放出されるものと思われる。

4. 結 論

自然・生物系から排出されるメタンガスおよび二酸化炭素が地球温暖化に及ぼす影響を明らかにするために、有機性廃水を用いた嫌気性処理実験を行った。実験では、10℃および20℃におけるガス発生量を求めることにより、温度上昇が温暖化ガス発生量に与える影響を定量化するために温度係数を求めた。得られた温度係数を用いて温暖化により、さらに温暖化ガスの発生量が増加することを示すことができた。試算された温暖化促進のかかる結果は以下の通りである。(1) 環境温度10℃および20℃における実験より、温度係数1.119を得た、(2) 温暖化ガスの排出増加量を推定した結果、温度が5℃上昇することにより温暖化ガスは約8億トン増加すると推定された。温暖化ガスの発生源としては微生物に限定されたものであるが、温暖化ガスの発生にかかるダイナミックスを明らかにするための基礎的なデータを提供できたと考える。ただし、微生物由来の温暖化ガス発生に及ぼす生息地域の環境による影響を加味することにより、データの拡充を行うとともに検討の精度を向上させる必要がある。また今後、好気性微生物による温暖化への寄与についても実験データを利用した検討を行いたい。

参考文献

- 1) R.Randolf, "Kanalisation und Abwasser-Behandlung" 1964
- 2) http://yasulab.iis.u-tokyo.ac.jp/~wataru/publication/pdf/jsprs2001_spring_paper.pdf