

単純化されたモデルから得られた結果であり、その仮定の妥当性を実験的に詳しく調べることが、今後の緊急課題といえよう。

#### 4. おわりに

今年4月、日本学術会議は政府に、IGBP（地球圏・生物圏国際協同研究計画）の推進を勧告した。また、第1回目のIGBP国際シンポジウムが1991年9月に日本で開かれることも、すでに内定している。このシンポジウムでも、二酸化炭素を中心とした地球温暖化気体の動態が取り上げられることになっており、IGBPによる生態学者や気象学者などの広範な国際的な研究協力を通じ

て、多分野にわたる地球生態系の研究が、これから大いに進展するものと思われる。

#### 参考文献

- Budyko, M., 1973: 気候と生命（上・下）、内嶋・岩切共訳、東大出版会  
 気象庁、1989: 異常気象レポート'90、気象庁編  
 Lieth, H., 1975: Primary productivity of the biosphere, ed. by Lieth & Whittaker, Springer-Verlag (New York), 285-304.  
 Moore and Bolin, 1986: *Oceanus* 29, 9-15.  
 Oikawa, T., 1986: *Bot. Mag. Tokyo* 99, 213-223.  
 矢吹万寿, 1985: 植物の動的環境, 朝倉書店.

408 (土壌生態系; 微生物; 温室効果ガス)

## 2. 土壌生態系から放出される微量温室効果ガス\*

犬伏和之\*\*・土器屋由紀子\*\*\*

### 1. はじめに

温室効果ガスのうち、一酸化二窒素 ( $N_2O$ 、あるいは亜酸化窒素とも言う) とメタンは、土壌からの発生量が全発生量の中で特に大きい割合を占める。大気中の濃度は二酸化炭素の1/100-1/1,000と小さいが、水と二酸化炭素の赤外吸収がない、いわゆる“窓領域”の波長に吸収を持つため、温室効果における寄与率は第1表に示すように大きく見積られている。ここでは、これらの微量温室効果ガスの土壌システムからの放出について紹介する。

### 2. ガス発生の際としての土壌

最初に、土壌について定義しておきたい。土壌とは、「地表部における気候・生物・母材・地形の自然環境因子と人間活動および時間的因子の影響下で、岩石の風化物である無機物質と動植物・微生物の遺体およびその分解物である有機物質との相互作用によって垂直方向に分化した物理性・化学性・生物性の異なる土層の集合した体制で、高等植物の根の生育を支持できる部位をいう」

(高井・三好, 「土壌通論」, 1977)。つまり土壌は、深さ数10 cm から数mの厚さで地表を覆い、縦方向に構造を持ち、現在地球上の生命のほとんどを直接・間接に維持している場である、と理解される。

さて、土壌からのガス発生はその大部分が、土壌生物（土壌微生物を主体とする）に起因している。また大小様々の土壌動物も、ガス発生に大きく寄与する場合がある。従って特にガスの発生を考える場合、土壌は土壌生物の棲息する生態系としてとらえる必要がある。 $N_2O$  やメタンの相当部分がこの領域で発生し、また他の微生物により酸化されたり、還元されたりエネルギー源として利用されたりする。大気へ放出されるのは、これらの微生物が放出・吸収した結果で、いわばそれらの決算値のようなものである。

土壌中に棲息する生物を大きさで分類すると、ミミズなど数 cm の大きさのものから数  $\mu m$  の細菌まで、多くの種が生存している。各生物の個体数は第2表のようになる。圧倒的に多いのがバクテリアであるが、土壌の種類による差は小さい。その点、土壌動物は条件の違いによって個体数が大きく変動する。また二酸化炭素の発生量について調べると、土壌動物が土壌全体からのガス発生に寄与している割合は、1.4~17%程度である(武田, 1989)。

\* Greenhouse-effect trace gases emitted from soil ecosystem.

\*\* Kazuyuki Inubushi, 三重大・生物資源学部.

\*\*\* Yukiko Dokiya, 気象庁・気象大学校.

第1表 微量温室効果ガス $N_2O$ ・ $CH_4$  と  $CO_2$ 

	$N_2O$	$CH_4$	$CO_2$
大気中の濃度 (ppm)	0.3	1.7	350
年増加率 (%)	0.3	1	0.5
温室効果への寄与率 (%)	~5	~15	~50
大気中での平均滞留時間 (年)	150	~10	~100

第2表 土壌の生物

	ツンドラ	亜高山林	温 帯		熱 帯	
			広葉樹林	草 地 プレーリー	サバンナ	林
微生物 ( $g^{-1}$ soil)						
細菌	$7 \times 10^6$	$5 \times 10^6$	$6 \times 10^6$	$10 \times 10^6$	$55 \times 10^6$	$50 \times 10^6$
糸状菌	1,200	4,000	3,000	3,000	—	6,000
微小動物 ( $m^{-2}$ )						
線虫, 原生動物	$28 \times 10^6$	$270 \times 10^6$	$200 \times 10^6$	$500 \times 10^6$	30,000	65,000
中型動物 ( $m^{-2}$ )						
トビムシ, ダニ	100,000	400,000	40,000	25,000	2,000	15,000
ヒメミミズ	150,000	750,000	30,000	10,000	0~400	0~1,000
シロアリ	0	0	1,000	1,000	4,000	5,000
その他	1,000	1,000	500	1,000	500	1,000
大型動物 ( $m^{-2}$ )						
ミミズ類	<10	20	200	750	1~100	0~250
倍脚類, 等脚類	0	500	1,000	500	<1	400
甲虫, 陸ガイ等	0	300	200	200	100	1,000

(武田, 1989)

土壌微生物は、土壌の表層付近に圧倒的に多く分布する。微生物には酸素を必要とする好氣的 (aerobic) なグループと、酸素があっても生きられない嫌氣的 (anaerobic) なグループ、それらの中間的なグループがあり、メタン生成細菌や  $N_2O$  の生成に関わる脱窒菌の一部は嫌氣的なグループに属する。

$N_2O$  とメタンの発生源として、土壌生態系がどの程度関与しているかを第3表に示す。 $N_2O$  の発生源としては60%程度が、メタンでは、土壌動物であるシロアリを含めると70%程度が土壌生態系に由来する。そのうち、農業活動に直接関係するものは、 $N_2O$  では肥料施用土壌と開墾の約10%、メタンでは水田と家畜の約30%と見積られている。

第3表  $N_2O$  と  $CH_4$  の発生源 ( $10^{12}$  g/Y)

$N_2O$		$CH_4$	
土壌: 自然土壌	5~15	湿地	100~200
施肥土壌	0.8~4	水田	60~170
開墾	0.3~1	シロアリ	10~100
		家畜の腸内発酵	65~100
		廃棄物の埋立地	30~70
		石炭・天然ガス	50~100
バイオマス燃焼	1.5~3		50~100
海洋	2~5		5~20
合計	10~30		400~640

(陽, 1989; 和田, 1990)

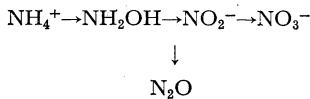
### 3. $N_2O$ の発生源

Bouman (1988) や Ueda ら (1989) のまとめによる

と、 $N_2O$  の発生源は、燃焼 (4~10 Tg/y,  $Tg=10^{12}g$ )、陸域の硝化・脱窒 (8~14 Tg/y)、海洋の硝化・脱窒 (2~6 Tg/y) と考えられている。一方、大気中に放出された  $N_2O$  は対流圏では安定で、成層圏に運ばれた後、おもに光分解されている。その差引き分として、年間、窒素に換算して 4 Tg の  $N_2O$  が大気中で増加し続けている。

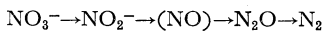
土壤微生物による  $N_2O$  の生成には、次の2つの経路がある。

(1) 硝化系



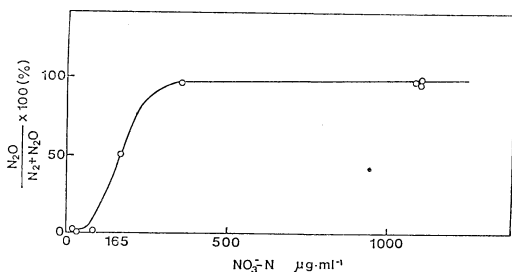
この系は好気的な条件で起こり、その途中で生成される  $N_2O$  は副産物であるが最終生成物でもあり、これ以上消費されないで系内にとどまるか、あるいは大気中に放出される。

(2) 脱窒 (硝酸還元) 系



この系は嫌気的な条件で起こるが、この場合  $N_2O$  は中間生成物であり、通常の場合では  $N_2$  まで還元される。しかし農耕地では、硝酸アンモニウムなどの施肥により  $N_2O$  の増える場合がある (和田, 1990)。脱窒系で  $N_2$  として大気中へ放出されるか  $N_2O$  で放出されるかを決定するのは、 $NO_3^-$  濃度であることが、Wada ら (1990) の実験で明らかにされた。水田土壌を用いたインキュベーション実験で、 $N_2$  と  $N_2O$  の比は 0~100% の変動を示し、 $NO_3^-$  濃度が増加するほど  $N_2O$  の比率が高くなった (第1図)。

いずれにしても、 $N_2O$  は土壤中で発生と消費を繰り返しており、そのフラックスに影響を与える因子も複雑である。また水田土壌が場合によっては  $N_2O$  のシンク



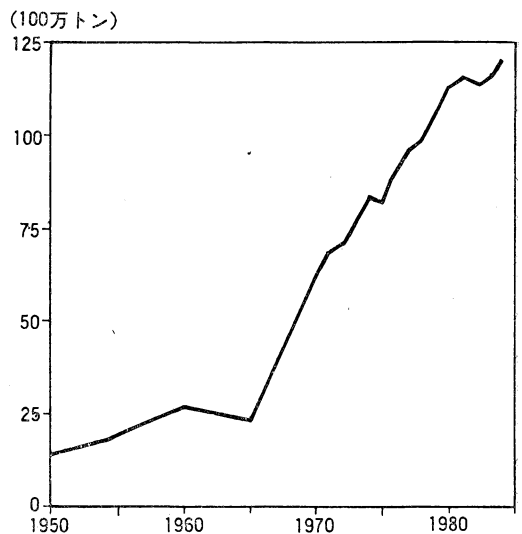
第1図 湛水土壤中の  $N_2O$  生成と培地中の  $NO_3^-$  濃度の関係 (Wada ら, 印刷中)

になることも見出されている (陽, 1989)。海洋からの  $N_2O$  生産には、脱窒過程の方が効いているという最近の知見 (Yoshida ら, 1989) とあわせて、脱窒過程の重要性が今後さらに問題になるだろう。

一方、近年農業の機械化が進み、肥料の大量使用が問題になっている。世界の肥料使用量の変化を第2図に示すが、近代農業では、収穫を倍にするには、肥料は10倍必要であるともいわれている (小山, 1990)。そのため、作物に吸収されずに残った窒素肥料から、主に (1) の経路を経て  $N_2O$  が発生していることも、 $N_2O$  増加の一因と考えられている。また熱帯雨林などでも、世界平均の土壌からの  $N_2O$  フラックスの10~30倍の値を示すことがある (Kaplan, 1984)。まだ量的な結論は出ていないが、今後対策を考えるためにぜひ必要な情報である。

4. メタンの発生源

メタンは嫌気的な生態系で微生物により生成される場合と、非生物的に生成される場合とがある。前者の発生源としては、湿地や湖沼の堆積物や水田土壌などが挙げられる。また牛や羊などの反すう動物も腸内でセルロース発酵が起こり、メタンの大きな発生源となっている。一方、後者の非生物的発生源としては、焼き畑などの生物遺体の燃焼や天然ガスなどの化石燃料が挙げられる。ここでは土壤生態系からの生物的发生源のうち、水田と

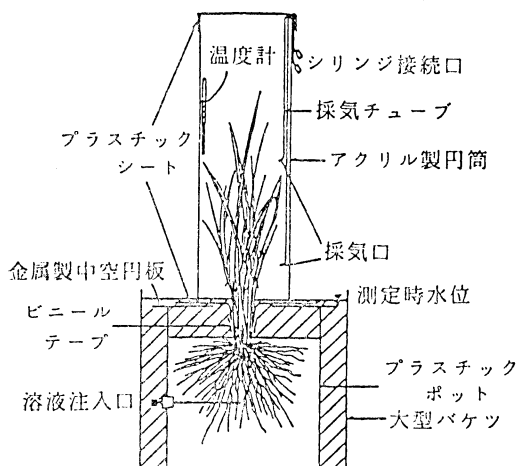


第2図 世界の肥料使用量 (1950~84年) (小山, 1990)

第4表 水田土壤中での酸化還元反応と有機物分解

物質変化	反応式*	反応の起こる土壌 Eh
分子状酸素の消失	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	+0.6 ~ +0.3 V
硝酸の消失	$5 \text{CH}_2\text{O} + 4 \text{NO}_3^- \longrightarrow 5 \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 2 \text{N}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0.4 ~ +0.1
Mn (II) の生成	$\text{CH}_2\text{O} + 2 \text{Mn}^{4+} + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{HCO}_3^- + 5 \text{H}^+ + 2 \text{Mn}^{2+}$	+0.4 ~ -0.1
Fe (II) の生成	$\text{CH}_2\text{O} + 4 \text{Fe}^{3+} + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{HCO}_3^- + 5 \text{H}^+ + 4 \text{Fe}^{2+}$	+0.2 ~ -0.2
S (II) の生成	$2 \text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 2 \text{HCO}_3^- + 2 \text{H}^+ + \text{S}^{2-}$	0 ~ -0.2
メタンの生成	$\text{CH}_3\text{COOH} \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-0.2 ~ -0.3
メタンの生成	$\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-0.2 ~ -0.3

\*  $\text{CH}_2\text{O}$  は土壤有機物の近似式を表す (Takai and Kamura, 1966; Inubushi ら, 1984を一部改変)。

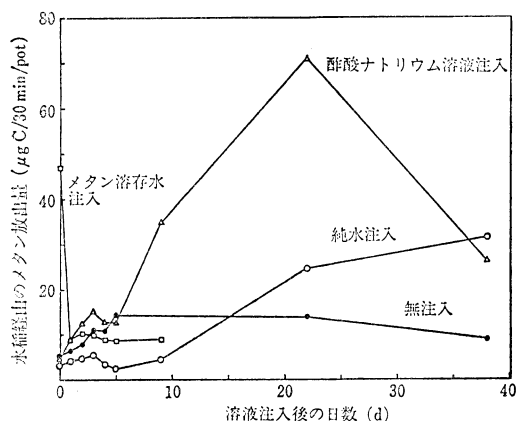


第3図 水田土壤から水稻を經由して大気へ放出される気体を捕集するチャンパー。  
(犬伏ら, 1989)

シロアリについて概述する。なお、大気へ放出されたメタンは大部分が対流圏で消失する (巻出, 1988)。

#### 4.1 水田からのメタンの発生

水田土壤中では、第4表に示すような酸化還元反応が順次進行する。この反応と共役して有機物が分解される。有機態炭素は、最終的に二酸化炭素かメタンにまで分解され土壤から大気へ放出される。両者の比率は80:1~1:1まで、土壤の種類や肥料のやり方等の来歴、あるいは地温などにより変化する。特に有機物含量の多い土壤やワラなどの新鮮有機物を施用した場合、あるいは高温ではメタン生成量が大きくなる。一方、鉄を多く含む土壤では、第4表の鉄還元反応が完了するまでに時間がかかるので、メタンは生成しにくい (Inubushi ら,



第4図 水稻の根圏へ各種溶液を注入したことによる水稻經由のメタン放出量の変化。  
(犬伏ら, 1989)

1984; 1990)。

土壤中で生成されたメタンは、主に稲体を経由して大気へ放出されることが明らかにされている (陽・八木, 1988; 犬伏ら, 1989)。同様の現象は湿性植物でも検出されているが、稲は特にメタンの輸送能力が高く、栽培面積も圧倒的に広いのが特徴である。例えば第3図に示すような水稻のポット栽培を行い、注射針からメタンの溶存した蒸留水や、メタン生成の基質となる酢酸ナトリウムの水溶液を注入したところ、メタン放出量は大幅に増加した (第4図)。また土壤からのメタン放出量は、土壤や肥料の種類ばかりでなく、水管理など人為的管理によってもかなり変化することが見だされてきた (陽・八木, 1989; 陽, 1990)。さらに土壤中には、メタンを酸化する微生物もいることが知られており、今後この酸化能力を調べて行くことも必要であろう (犬伏, 1990)。

水田は熱帯モンスーン地域を中心に、約1億5千万haにも広がり、日本でも耕地面積の約半分を占めている。また、水稲作は極めて安定で生産性の高い農業形態である。ここで生産されるコメを主食とする約20億の人々のために、水田からのメタン放出を制御する技術を早急に確立し、可能なものから実施してゆかねばならない。

#### 4.2 シロアリはメタンの発生源として重要か

多くの文献で、メタンの発生源としてシロアリが登場し、人目を引く。この発生源の大きさについては、1983年 Nature 誌上で活発な論争が行われ、まだ完全には結論が出ていない。この問題を最初に Science 誌上で提起したのは、NCAR の研究者 Zimmerman ら (1982) で、彼らは室内で2種類のシロアリのコロニーについてメタン生成量を測定し、地球上のシロアリの population を推定し算出した。シロアリの生態学の専門家によると、この計算にはかなり大胆な仮定が含まれている (阿部, 1989)。

シロアリは熱帯林やサバンナでは、最大で4,000~5,000/m<sup>2</sup>、約10g/m<sup>2</sup>も存在し、主として枯死植物を分解しているところから、「森の清掃係」として知られている。従って、シロアリは熱帯雨林の存続に不可欠な存在であると言える。またオオキノコシロアリは、人家より大きい塚をつくり、その中では完全な空調を行い、きのこを栽培し乾期に備えるなど、一種の社会的生物である (阿部, 1989)。

シロアリがメタンを発生するのは、シロアリの後腸内に原生動物を主体とするセルロース分解酵素を持つ生物が共生しており、さらにそれらの原生動物にメタン細菌が共生しているからである。つまり、牛や羊などの反すう動物と似たメタン発生機構を持っているのである。熱帯におけるシロアリの現存量からみると、メタンガスの発生源として無視できないという上述のような意見もあるし、それと異なる逆の意見もある (Seiler ら, 1984; 鶴田, 1990)。いずれにしても、量的な問題は今後のデータの集積に待つことになる。

#### 5. おわりに

大気の厚さ(対流圏で約8~17km)に比べれば、土壌の厚さは極めて薄いものである。しかし、この土壌を基盤として光エネルギーを利用し生育する植物が、人間をはじめ多くの生物の直接、間接の食料となっている。また土壌は、保水能や各種の浄化能・緩衝能を持ってお

り、地球上で一つの安定したサブシステムを構成している。

さらに土壌は他と独立したシステムではなく、大気ともガス交換を行っている。(土壌の O<sub>2</sub> 吸収や CO<sub>2</sub> 放出は土壌呼吸と呼ばれている。) こうした「生きている」土壌を支えるのが、土壌中の生物であり、特に土壌微生物の働きには注目する必要がある。

ここでは、土壌から放出される微量温室効果ガスとして N<sub>2</sub>O とメタンを取り上げたが、これらのガスの生成や代謝にも土壌微生物が深く関わっている。また、シロアリや水稲のように土壌中に生育する生物も含めた土壌生態系全体を十分に理解することが、ガスばかりでなく各種の物質やエネルギーの地球全体での循環を知り、これを制御するために、今後ますます重要になる。

#### 謝 辞

本報告のために資料を提供いただき御助言いただいた陽捷行氏(農業環境技術研究所)および和田英太郎氏(三菱化成生命科学研究所)に深い感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 阿部琢哉, 1989: シロアリの生態, 東大出版会。  
 Bouman, A.F., 1988: Int. Conf. Soils and Greenhouse effect, Int. Soil Ref. and Inform. Cent., 143。  
 服部 勉, 1978: 微生物生態入門, 東大出版会。  
 Inubushi, K., Wada, H., and Takai, Y., 1984: Easily decomposable organic matter in paddy soil IV, Relationship between reduction process and organic matter decomposition, Soil Sci. Plant Nutr., 30, 189-198。  
 犬伏和之, 堀 謙三, 松本 聡, 梅林正直, 和田秀徳, 1989: 水稲体を經由したメタンの大気中への放出, 土肥誌, 60, 318-324。  
 \_\_\_\_\_, 1990: 水田におけるメタン発生機構とその制御, 化学工業, 41, 586-591。  
 Inubushi, K., Umebayashi, M., and Wada, H., 1990: Trans. Int. Congress Soil Sci. II, 249-254。  
 Kaplan, W., 1984: Sources and sinks of nitrous oxide, Current perspectives in microbial ecology, M.J. Klug and C.A. Reddy (ed.), Amer. Soc. Microbiol., Washington, 478-483。  
 小山雄生, 1990: 土の危機, 読売科学選書 27, 98。  
 巻出義紘, 1988: 大気中の微量気体と地球環境, 化学と生物, 26, 50-53。  
 陽 捷行, 八木一行, 1988: 水田から発生するメタンのフラックスの測定法, 土肥誌, 59, 458-463。  
 \_\_\_\_\_, 1989: 家畜からのメタンと温室効果, 畜産の研究, 43, 1121-1122。  
 \_\_\_\_\_, 1989: 日本地球化学会年会要旨, 30。  
 \_\_\_\_\_, 八木一行, 1989: 温室効果への農業生態

- 系の関わり, 研究ジャーナル, 12(8), 14-19.
- \_\_\_\_\_, 1990: 土壤肥料学会要旨集 36, シンポジウム, 松戸.
- Seiler, W., Conrad, R., and Scharffe, D., 1984: Field studies of methane emission from termite-nests into the atmosphere and measurements of methane uptake by tropical soils, *J. Atmos. Chem.*, 1, 171-186.
- Takai, Y., and Kamura, T., 1966: The mechanisms of reduction in waterlogged paddy soil, *Folia Microbiol.*, 11, 304-313.
- 高井康雄, 三好 洋, 1977: 土壤通論, 朝倉書店, 5-6.
- 武田博清, 1989: 土壤生物と分解, 森林生態学, 堤利夫編, 朝倉書店, 111-123.
- 鶴田治雄, 1990: 大気中のメタンの発生源とその挙動, 化学工業, 41, 572-578.
- Ueda, S. *et al.*, 1989: Proc. Annual Meeting Geochem. Soc. Japan, 212.
- Wada, E., Yoshida, N., Yoh, M., and Kabaya, Y., 1990:  $^{15}\text{N}$  abundance of  $\text{N}_2\text{O}$  in aquatic ecosystems with emphasis on denitrification, "Cycling of Reduced Gases in the Hydrosphere", D. D. Adams, S.P. Saitzinger, and P.M. Crill(ed.), E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlungen, Stuttgart, FRG (in press)
- 和田英太郎, 1990: 窒素安定同位体比による  $\text{N}_2\text{O}$  発生源の評価「人間環境系」研究報告集(印刷中)
- 和田秀徳, 1989: メタンへの対応と課題, 化学技術誌 MOL, 27, 53-60.
- Yoshida, N., Morimoto, H., Hirano, M., Koike, I., Matsuo, S., Wada, E., Saino, T., and Hattori, A., 1989: Nitrification rates and  $^{15}\text{N}$  abundances of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{NO}_3^-$  in the western North Pacific, *Nature*, 342, 895-897.
- Zimmerman, P.R., Greenberg, J.P., Wandiga, S.O. and Crutzen, P.J., 1982: Termites: A potentially large source of atmospheric methane, carbon dioxide and molecular hydrogen, *Science*, 218, 563-565.

05: 305 (永久凍土; 気候変動; ツンドラ; タイガ; 古気候; 最終氷期)

### 3. 永久凍土と気候\*

福田 正己\*\*

#### 1. はじめに一永久凍土の分布一

永久凍土は地球の全陸地の約15%を占め, シベリアからアラスカ・極地カナダに広範囲に分布している。この永久凍土を分類して第1表に示す。この分類は, 凍土表面を覆う植生の違い, 垂直的・水平的な凍土の分布, 凍土が形成されている場所によっている。寒冷の度合で植生の種類と永久凍土の分布深さの双方が独立に決ってくるので, 永久凍土の表面植生を見れば, 地中の永久凍土の状態がある程度推定できる。タイガとツンドラを比較すれば, ツンドラがより寒冷な地域に分布し, その下の永久凍土も深くまで存在する。しかし, 植生の分布状態には, 冬の寒冷度と夏の温暖度, 降水量とが関わっている。極地砂漠とツンドラとの差は必ずしも永久凍土の深さや分布を反映しない。極地砂漠の形成には, 夏の冷涼さと乾燥が関わっているからである。一例として, 南極半島の露岩地域 (Seymour 島南緯 64 度年平均気温  $-9.5^\circ\text{C}$ ) では無植生で, 永久凍土の深さは約 200 m で

ある。一方, 極地カナダ (Tutkutuyaktuk 北緯 70 度年平均気温  $-12.0^\circ\text{C}$ ) ではツンドラ 地域で永久凍土の深さも 400 m 以上となっている。年平均気温は極地カナダの方が低く, 永久凍土も深くまで形成されているが, 最暖月平均気温は  $+8^\circ\text{C}$  まで上昇するのに, 南極半島では最暖月平均気温は  $-0.9^\circ\text{C}$  に過ぎない。植物の生育条件としては, 冬の寒さよりも夏の温暖さがより重要である。東シベリアのオイミヤコンでは最低気温  $-71.2^\circ\text{C}$  を記録しているが, 夏には  $+30^\circ\text{C}$  にまで温度が上昇するので, カラマツから成り立つタイガ地域となっている。

次に北半球の永久凍土の分布を第1図に示す。(福田, 1980)。分類の基準と凡例は第1表に挙げてある。東シベリアでは, 北緯 60 度まで永久凍土の連続的分布が広がるが, 西シベリアでは北極海に寄って狭くなっている。

アラスカから極地カナダでの連続的永久凍土分布でも, 東側でより南まで分布が広がり, 西側で北に寄っている。こうした分布状態を決めるのは, 永久凍土を形成

\* Permafrost and Climate.

\*\* Masami Fukuda, 北大・低温科学研究所.