

- B-5 1 温室効果ガスの人為的な排出源・吸収源に関する研究  
(2) CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O の排出・吸収に関する研究  
⑥ 我が国の森林土壌での CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 収支

研究代表者 農業環境技術研究所 環境管理部 影響調査研究室 鶴田治雄

農林水産省 農業環境技術研究所  
環境管理部 影響調査研究室 鶴田治雄  
農林水産省 林野庁 森林総合研究所  
北海道支所 育林部 土壌研究室 石塚成宏  
(委託先)  
東京農工大学 農学部 楊 宗興

平成10年度予算額 4、500千円

#### [要旨]

自然土壌は温室効果ガス N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> の全球的循環に大きな役割を果たす。にもかかわらず調査研究は不足しており、大きな不確実因子となっている。そこで、これまでデータのないアジア地域の森林において、N<sub>2</sub>O 放出、CH<sub>4</sub> 吸収フラックスの系統的調査研究を開始した。

CH<sub>4</sub> 吸収フラックスの空間的なバラツキを検討した結果、その変動係数は予想外に小さく、測定用チャンバーの必要設置個数は同一林分内では3個程度で充分であることが明らかとなった。N<sub>2</sub>O フラックスは明瞭な季節変化を示し、N<sub>2</sub>O 放出が土壌温度に従って行われていることが判明した。より湿潤な条件にある谷底部は、尾根部や斜面部よりも常時2倍程高い放出速度を示した。各面積割合を勘案して見積もった調査地全体からの年間放出速度は 0.56 kg N ha<sup>-1</sup> で、これまでの温帯林の多くの結果より高かった。

[キーワード] 温室効果ガス、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、メタン(CH<sub>4</sub>)、森林、自然土壌、アジア

#### 1. 序

生態系炭素サイクルの一部として土壌からの CO<sub>2</sub> 放出は古くから知られていたが、自然土壌が N<sub>2</sub>O や CH<sub>4</sub> の放出・吸収源として研究されはじめたのはようやく 1980 年代の後半頃からである。これまでの調査データから、自然陸上生態系が N<sub>2</sub>O や CH<sub>4</sub> の全球的循環に重要な役割を果たすことがある程度定量的にも明らかになってきた。たとえば IPCC レポート (IPCC、1994) では自然土壌からの総 N<sub>2</sub>O 発生量は 6 Tg N yr<sup>-1</sup> と見積もられており、これは自然起源、人為起源を含む全 N<sub>2</sub>O ソースの 40% に相当する。

しかし、現段階での見積もりが基礎としている調査結果はまだ限られたものでしかなく、この理由により、推定誤差は非常に大きい。たとえば IPCC レポート (IPCC、1994) で報告されて

いる温帯林からの  $N_2O$  放出量の見積もりは、北米とヨーロッパでの測定結果がその下限値と上限値として採用されている段階で、 $0.1-2.0 \text{ Tg yr}^{-1}$  の推定幅がある。これまで温帯林での  $N_2O$  や  $CH_4$  フラックスの調査研究は、すべて北米およびヨーロッパで行われてきたものである。温室効果ガスの全地球的収支に占める自然土壌の重要性から、その推定精度の改善は不可欠であるが、そのためには両地域以外での知見が欠かせない。陸地の3割を占め、独自の気候・土壌条件をもつ世界の代表的地域であるにもかかわらず、アジアでの知見はこれまで皆無に等しい。

本研究は、アジアの温帯林の役割を明らかにすべく、日本の森林土壌について  $N_2O$ 、 $CH_4$  フラックスの調査研究を始めて開始したものである。

## 2. 研究目的

これまでの知見によれば、森林はメタンについては吸収源として、 $N_2O$  については放出源として機能する。本研究は、我が国の森林の  $N_2O$ 、 $CH_4$  フラックスを系統的に調査し、これまでほとんど調査が行われていないアジア地域の森林のメタン吸収および  $N_2O$  放出フラックスの基礎データを収集することを目的とした。とくにわが国の森林では、空間的不均一性の大きさが調査研究を進める際の問題点として予想される。そこで本年度は、同一林内での空間的ばらつきがどの程度存在するのかという点を明らかにし、森林土壌におけるメタン吸収・ $N_2O$  放出量評価手法の開発に貢献するデータを蓄積することもめざした。

## 3. 研究方法

### (1) メタン

森林総合研究所北海道支所内実験林において、同一斜面上の2つの地点においてそれぞれ9つのガス採取用ステンレスチャンパー（直径40cm、高さ15cm）を、2m間隔で設置した。それぞれの地点において、6月3日と7月13日にサンプリングを行い、メタン吸収フラックスを測定した。メタンの地表面フラックスの年変動、季節変動を把握するため、1995年3月から1997年の11月までの約3年間にわたり、茨城県北茨城市小川学術参考林（落葉広葉樹天然林）の尾根と谷頭部に固定試験地を設置し、同様のフラックス測定をおこなった。

### (2) 亜酸化窒素

東京農工大学農学部附属波丘地実験施設（東京都八王子市）内の森林を調査地とした。森林斜面を調査ユニットとし、その尾根部、斜面部、谷底部のそれぞれに3つのステンレス製チャンパーを固定し、1998年5月から1999年2月まで月2回の頻度で  $N_2O$  フラックスを測定した。また、各位置にポーラスカップを埋設し、土壌水分張力も同時に測定した。

## 4. 結果・考察

### (1) メタン

6月3日には斜面上部で  $-3.32 \pm 0.82$ 、斜面下部で  $-3.09 \pm 0.68$ 、7月13日には斜面上部で  $-3.46 \pm 0.51$ 、斜面下部で  $-2.70 \pm 0.72$  ( $\text{mgCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) であった。また、斜面下部と斜面上部を合わせた18個のチャンパーの平均値と標準偏差は、6月3日が  $-3.08 \pm 0.72$ 、7月13日が  $-3.20 \pm 0.74$  であった。6月3日の測定では斜面下部と斜面上部で有意な差が認められなかったが、7月13日には有意な差が認められた。全18個のフラックス平均値の変動係数が0.23と非常に小さいこと

から、同じ林分内であれば3個程度のチャンバーを設置するだけでも、かなり正確な推定ができると判断された。また、より正確な精度を求めるなら、斜面上なら斜面上部に3個、斜面下部に3個程度のチャンバーを設置するのが実際的だと考えられる。小川学術参考林でのフラックス値は常に尾根部で高く、谷頭部で低くなり(図1)、尾根部での3年間の平均値は $4.9 \text{ mgCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 、谷頭部では $2.5 \text{ mgCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ であった。谷頭部、尾根部ともにフラックスは夏に低く、冬に高くなる傾向があった。また、1995年のデータと1997年のデータを比較すると、同じ気温であればほぼ同じフラックスを示すことから、メタン吸収フラックスの年変動は比較的小さいことが明らかになった。尾根部の値は世界の他の観測例に比べれば比較的高い値であった(表1)。

## (2) 亜酸化窒素

測定を行った尾根部、斜面部、谷底部のそれぞれで、 $\text{N}_2\text{O}$  放出は春に開始し、真夏に最大となり、初冬には検出限界レベルとなる明瞭な季節変化を示した(図2)。フラックスは土壤温度に対して良好な相関関係を示し( $r^2=0.66\sim 0.82$ )、土壤温度と密接に関係していた。これらから、少なくとも本調査地に関する限り、土壤温度が $\text{N}_2\text{O}$  フラックスの季節変化を支配する主要因子であることが判明した。各時期の $\text{N}_2\text{O}$  フラックスレベルおよび季節変化パターンは尾根部と斜面部でほぼ同一であった。これらに対し、谷底部の $\text{N}_2\text{O}$  フラックスは年間にわたり約2倍の値で推移し、より活発な $\text{N}_2\text{O}$  放出が行われる場であった。谷底部の土壤水分張力は他の位置よりも常に高かったため、湿潤な土壤条件のため微生物による $\text{N}_2\text{O}$  生成が活発に行われていたと推測された。

斜面上の3つの位置で年間にわたり高頻度で行った本測定結果から、本調査地からの年間 $\text{N}_2\text{O}$  発生量は $0.56 \text{ kg N ha}^{-1}$ と見積もられた。これまでの森林からの $\text{N}_2\text{O}$  放出量の文献値と比較すると(表2)、大気からの降下物の影響が著しいドイツのデータを除き、本研究で明らかになった放出量はかなり高い範囲に分類された。本調査地付近では、森林渓流水中の $\text{NO}_3^-$  濃度が $100\mu\text{M}$ 程度と高いなど、大気から過剰に負荷された窒素降下物の影響で森林の窒素飽和現象が生じていることが示されている(楊 1996、楊 1998)。このような窒素飽和の影響を受けて、森林からの $\text{N}_2\text{O}$  放出量が増加している可能性が明らかとなった。

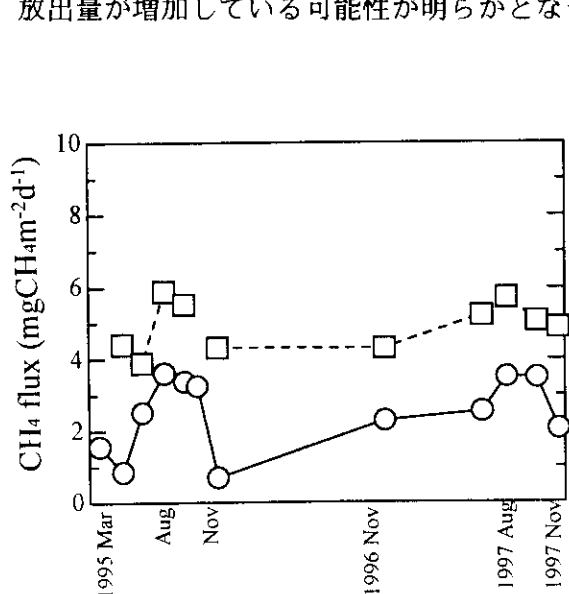


図1 小川学術参考林(北茨城市)における $\text{CH}_4$  吸収フラックスの測定例

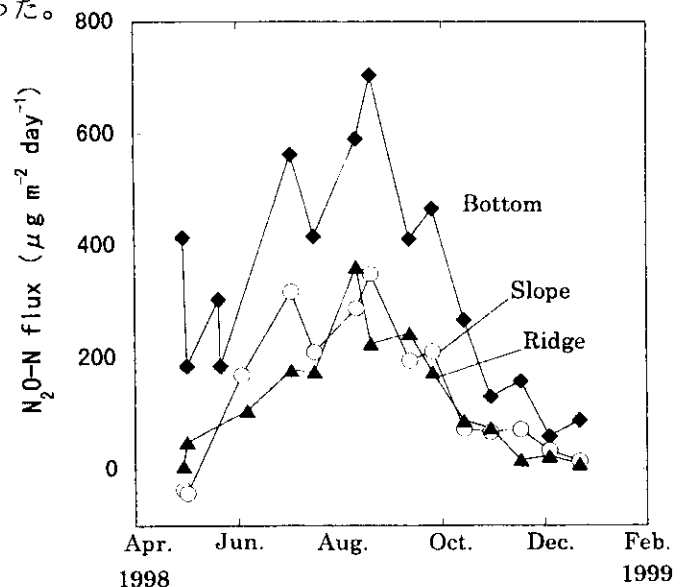


図2 森林の3地点(尾根、斜面、谷底部)での $\text{N}_2\text{O}$  フラックスの季節変化

表1 世界の森林土壌で測定された CH<sub>4</sub> 吸収フラックスの比較

region	country	vegetation	uptake rate (mgCH <sub>4</sub> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		Reference
			range (seasonal)	average (annual)	
North America	U.S.A.	<i>Pinus</i>	3.2~4.2**	3.5*	Stuedler <i>et al.</i> , 1989
		<i>Quercus, Acer</i>	3.5~5.3**	4.2*	Stuedler <i>et al.</i> , 1989
	U.S.A.	<i>Tsuga, Pinus, Prunus etc.</i>	0~2.8	1.65	Crill, 1991
	U.S.A.	<i>Populus</i>	0.55***	ND	Whalen <i>et al.</i> , 1992
		<i>Betula</i>	0.22***	ND	Whalen <i>et al.</i> , 1992
		<i>Picea</i>	0.62 & 0.55***	ND	Whalen <i>et al.</i> , 1992
	Canada	<i>Picea, Ledum, Betula</i>	ND	0.27~1.57	Adamsen & King, 1993
		<i>Pinus, Quercus</i>	ND	2.7	Adamsen & King, 1993
	U.S.A.	spruce and fir	0.64~2.6*	0.64~1.7*	Castro <i>et al.</i> , 1993
	U.S.A.	<i>Pinus</i>	3.2~7.0*	ND	Castro <i>et al.</i> , 1994
	U.S.A.	<i>Pinus</i>	0~7.4	2.9	Castro <i>et al.</i> , 1995
		hardwood	0.8~6.4	4.5	Castro <i>et al.</i> , 1995
		<i>Quercus</i>	2.1~7**	3.8~5.4	Goldman <i>et al.</i> , 1995
Central America	Costa Rica	<i>Laetia, Pentaclethra</i>	0.3~2.3**	1.20~1.26	Keller & Reiners, 1994
Europe	Germany	?	0~1.8*	0.49*	Koschorreck & Conrad, 1993
		deciduous forest	0~5.9***	2.2*	Born <i>et al.</i> , 1990
		spruce forest	ND	0.25*	Born <i>et al.</i> , 1990
	Scotland	<i>Acer, Fraxinus</i>	0.19~3.30	1.4	Dobbie <i>et al.</i> , 1996a
	Denmark	<i>Fagus, Picea etc.</i>	0.27~1.06	0.7	Dobbie <i>et al.</i> , 1996a
	Poland	birch, alder, oak, pine, etc.	0.84~1.23***	1.0	Dobbie <i>et al.</i> , 1996a
	U.K.	<i>Acer, Fraxinus, Fagus</i>	2.19~2.97	ND	Dobbie & Smith, 1996b
	Denmark	<i>Picea, Quercus</i>	ND	0.64~1.7*	Priemé & Christensen, 1997
	Asia	Japan	<i>Quercus, Fagus, Acer</i>	0.69~3.60	2.49
Japan		<i>Quercus, Fagus, Acer</i>	3.89~5.88	4.93	this study

\* adjust the unit (recalculated) \*\* the value read from graphs \*\*\* value measured only once

表2 温帯地域で測定された森林土壌からの N<sub>2</sub>O の年間発生量

Vegetation	Country	N <sub>2</sub> O	
		kgN ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	References
• Pine	USA	0.010	Bowden <i>et al.</i> (1990)
• Hardwood	USA	0.017	Bowden <i>et al.</i> (1990)
• spruce-fir	USA	0.02-0.08	Castro <i>et al.</i> (1993)
• Douglas-fir	USA	0.03-0.09	Matson <i>et al.</i> (1992)
• Spruce	Austria	0.081	Henrich & Haselwandter (1997)
• Spruce	Sweden	0-0.16	Klemedtsson <i>et al.</i> (1997)
• Hardwood	USA	0.23	Bowen <i>et al.</i> (1993)
• Beech	Germany	5.6	Brumme & Beese (1992)
		0.1 - 2	IPCC (1994)*
• Oak	Japan	0.56	This study

\*calculated from the data of IPCC (1994) divided by an area of temperate forest (10 × 10<sup>12</sup> m<sup>2</sup>).

## 5. 本研究により得られた成果

メタンフラックスの空間的不均一性の程度、求める精度に応じて必要とするチャンバーの設置数が明らかになった。 $N_2O$  フラックスについては、斜面位置による系統的違いおよび温度依存性を見出した。これまで温帯林でわずかとされてきた  $N_2O$  フラックスが調査地でかなり高いことが判明し、森林の窒素飽和というこれまで未知の現象が、 $N_2O$  放出量を増大させる重要な要因となっている可能性が明らかとなった。

## 6. 参考文献

- Adamsen, A. P. S., and King, G. M. (1993) Methane consumption in temperate and subarctic forest soils: rates, vertical zonation and responses to water and nitrogen. *Applied Environmental Microbiology* 59(2), 485-490
- Born, M., Dörr, H. and Levin, I. (1990) Methane consumption in aerated soils of the temperate zone. *Tellus* 42B, 2-8
- Bowden, R. D., P. A. Steudler, and J. M. Melillo (1990) Annual nitrous oxide fluxes from temperate forest soils in the Northeastern United States. *J. Geophys. Res.* 95 D9. 13997-14005.
- Bowden, R. D., M. S. Castro, J. M. Melillo and P. A. Steudler and J. D. Aber (1993) Fluxes of greenhouse gases between soils and the atmosphere in a temperate forest following a simulated hurricane blowdown. *Biogeochemistry* 21 61-71.
- Brumme, R. and F. Beese (1992) Effects of liming and nitrogen fertilization on emissions of  $CO_2$  and  $N_2O$  from a temperate forest. *J. Geophys. Res.* 97D12 12851-12858.
- Castro, M. S., Steudler, P. A., Melillo, J. M., Aber, J. D. and Millham, S. (1993) Exchange of  $N_2O$  and  $CH_4$  between the atmosphere and soils in spruce-fir forests in the northeastern United States. *Biogeochemistry* 18, 119-135
- Castro, M. S., Melillo, J. M., Steudler, P. A. and Chapman, J. W. (1994) Soil moisture as a predictor of methane uptake by temperate forest soils. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 1805-1810
- Castro, M. S., Steudler, P. A. and Melillo, J. M. (1995) Factors controlling atmospheric methane consumption by forest soils. *Global Biogeochemical Cycles* 9, 1-10
- Crill, P. M. (1991) Seasonal patterns of methane uptake and carbon dioxide release by a temperate woodland soil. *Global Biogeochemical Cycles* 5, 319-334
- Dobbie, K. E., Smith, K. A., Prieme, A., Christensen, S., Degorska, A. and Orlanski, P. (1996a) Effect of land use on the rate of methane uptake by surface soils in northern Europe. *Atmospheric Environment* 30, 1005-1011
- Dobbie, K. E. and Smith, K. A. (1996b) Comparison of  $CH_4$  oxidation rates in woodland, arable and set aside soils. *Soil Biology & Biochemistry* 28, 1357-1365
- Goldman, M. B., Groffman, P. M., Pouyat, R. V., McDonnell, M. J. and Pickett, S. T. A. (1995)  $CH_4$  uptake and N availability in forest soils along an urban to rural gradient. *Soil Biology & Biochemistry* 27, 281-286

- IPCC (1995) *Climate Change 1994*, Cambridge University Press.
- Keller, M. and Reiners, W. A. (1994) Soil-atmospheric exchange of nitrous oxide, nitric oxide, and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles* 8, 399-409
- Klemedtsson, L., A. K. Klemedtsson, F. Moldan and P. Weslien (1997) Nitrous oxide emission from Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition. *Biol. Fertil. Soils* 25, 290-295.
- Koschorreck, M. and Conrad, R. (1993) Oxidation of atmospheric methane in soil: measurements in the field, in soil cores and in soil samples. *Global Biogeochemical Cycles* 7, 109-121
- Matson, P. A., S. T. Gower, C. Volkman, C. Billow, and C. C. Grier (1992) Soil nitrogen cycling and nitrous oxide flux in a Rocky Mountain Douglas-fir forest: effects of fertilization, irrigation and carbon addition. *Biogeochemistry* 18, 101-117.
- Priemé, A. and Christensen, S. (1997) Seasonal and spatial variation of methane oxidation in a Danish spruce forest. *Soil Biology & Biochemistry* 29, 1165-1172
- Stuedler, P. A., Bowden, R. D., Melillo, J. M. and Aber, J. D. (1989) Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature* 341, 314-316
- Whalen, S. C., Reeburgh, W. S. and Barber, V. A. (1992) Oxidation of methane in boreal forest soils: a comparison of seven measures. *Biogeochemistry* 16, 181-211
- 楊 宗興・木平英一・八木一行 (1996) 渓流水  $\text{NO}_3^-$  濃度の地理的変動は大気降水物に由来したもののか? - 窒素同位体比によるアプローチ。日本環境科学会誌 9 94-95.
- 楊 宗興 (1998) 森林渓流水の硝酸態窒素濃度にみられる地理的勾配 - 生態学的メカニズムの立証。科学研究費補助金 基盤研究(C)(2) 研究成果報告書。

## 7. 研究成果の発表

### (1) 口頭発表

- S. Ishizuka, T. Sakata, and K. Ishizuka (1998)  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes on Japanese deciduous and coniferous forest soils. Proceedings of world congress of Soil Science. 1998 8, Montpellier, France.
- 石塚成宏・阪田匡司 (1998) 森林土壌のメタン酸化 - 2つの仮説とその検証 -。日本林学会講演要旨集。
- M. Yoh and Y. Takeshige (1999)  $\text{N}_2\text{O}$  emission and nitrogen saturation in Japanese forest. International Workshop on the Atmospheric  $\text{N}_2\text{O}$  budget: An analysis of the state of our understanding of sources and sinks of atmospheric  $\text{N}_2\text{O}$ .
- 楊 宗興 (1999) 自然渓流水中  $\text{NO}_3^-$  濃度の地理的勾配と森林の窒素過剰現象。日本化学会
- 武重祐史・碓井敏宏・楊 宗興・土器屋由紀子 (1999) 温帯落葉広葉樹の森林土壌における  $\text{N}_2\text{O}$  フラックス。日本化学会