

B-51 CH₄、N₂Oのインベントリーの精緻化と開発中核技術の内外への普及

(6) 農耕林地におけるCH₄、N₂Oの発生・吸収量の評価とその発生抑制技術の確立に関する研究

②東アジアの森林土壌におけるCH₄、N₂O収支の評価に関する研究

独立行政法人森林総合研究所

北海道支所 植物土壌系研究グループ 石塚成宏

立地環境研究領域 養分環境研究室 高橋正通・阪田匡司

北海道大学農学部 波多野隆介

東京農工大学農学部 楊 宗興

名古屋大学農学部 竹中千里

平成12～14年度合計予算額 8,794千円

(うち、平成14年度予算額 2,971千円)

〔要旨〕国内の森林におけるCH₄吸収量とN₂O発生量に関する研究は遅れており、測定実績が限られている。北海道と関東地方、琵琶湖周辺に限られていたCH₄吸収、N₂O生成フラックス観測を全国規模でおこない、そのフラックス形成メカニズムを解明することを目的とした。北海道から沖縄までに設置した30点以上の試験地においてCH₄およびN₂Oフラックス観測をおこなった。CH₄平均吸収速度は、0.14 mg C m⁻² d⁻¹ (沖縄・南明治山) から5.15 mg C m⁻² d⁻¹ (加波山広葉樹林) の範囲を示した。北海道の観測値は1.57±0.85 mg C m⁻² d⁻¹と低く、本州以南は2.13±1.21 mg C m⁻² d⁻¹と高かった。各生態系間のCH₄平均吸収速度は、表層5cmの土壌のCH₄酸化能と高い正の相関を示した。東海地方の試験地の土壌において、CH₄吸収量と水溶性アルミニウム濃度の間に負の相関、CN比との間に正の相関が認められた。土壌に1mMと5mMのアルミニウム水溶液を添加した場合CH₄吸収量が抑制され、5mMの抑制量の方が大きかった。この結果より、水溶性アルミニウムがCH₄吸収量を抑制する物質のひとつであることが示された。また、山火事跡の土壌では水溶性アルミニウムが増加し、CH₄酸化を抑制している可能性が示唆された。N₂Oフラックスは地温の上昇にともない指数関数的に増加した。N₂Oの年間放出量は流域によって0.03～0.8 kg N ha⁻¹ yr⁻¹と大きく異なった。高N₂Oフラックスの森林ほど土壌の硝酸態窒素濃度が高く、また深部にまで硝酸態窒素が到達していた。室内実験の結果から、高N₂Oフラックス地では低N₂Oフラックス地に比べ、窒素負荷に対してより鋭敏に反応し多くのN₂Oを生成した。河川中の硝酸態窒素濃度とN₂Oフラックスの間には正の相関が認められ、河川の硝酸態窒素濃度から流域スケールのN₂O放出量推定する手法が有効であると考えられた。森林の窒素過剰に伴うN₂Oの放出係数は3.1%と見積もられた。

〔キーワード〕メタン、亜酸化窒素、森林土壌、広域観測、温室効果ガス

1. はじめに

地球温暖化ガスとして重要な二酸化炭素・メタン・亜酸化窒素の1750年から2000年にかけての温暖化への寄与率はそれぞれ60%、20%、6%とされている¹⁾。国内の森林における二酸化

炭素発生・吸収に関する研究は現在進行中であり研究例が多いが、メタンと亜酸化窒素に関しては研究が遅れており、まだほとんど測定された実績がない。メタンと亜酸化窒素は樹木による代謝が無視できるため、これらのガスの森林生態系からの発生・吸収量は、森林土壌からの発生・吸収量にほぼ等しいと考えられる。昨年度までの当環境庁プロジェクトにおいて、日本の森林土壌におけるメタン吸収フラックス値は、現段階では約 $3\sim 4 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であると推定された。この値は、世界の他地域のフラックス観測値よりも高く、日本の森林土壌はメタン吸収能が高いことを示している。しかし、まだ観測点数が10~20点程度と少なく、全国平均値を算出するにはさらに多くの観測例が必要である。また N_2O に関しても研究例が少なく、現在のところ2例があるのみである。またこれらの研究も関東地方に偏っており、地域的な特色の有無さえわかっていない。既存の N_2O フラックスの研究は北米と欧州でおこなわれたものが主であり、現在でも推定幅が年間 $0.1\text{-}2.0\text{Tg}$ と20倍の幅でしか示すことができない。陸域の大きな部分を占めるモンスーンアジアのデータは地球全域における N_2O 収支の算出にとって重要である。

2. 研究目的

本研究では昨年度までの成果を生かし、森林における CH_4 吸収フラックスと N_2O フラックスをより広域において測定し、それらの実測値から、森林土壌への CH_4 吸収量と N_2O 生成量を推定することを主目的とする。また様々なデータセットをそろえて比較検討することにより、異なるEcosystem間におけるフラックスの差を形成する主要因が推定される可能性がある。これらの主要因が明らかになれば異なるEcosystem間のフラックス形成モデルを作成することが可能となり、全国の発生吸収量を高精度で推定することが可能となる。特に N_2O フラックスについては、近年わが国の森林においても観測されている窒素飽和現象に注目しつつ解明する。

3. 研究方法

(1) フラックス観測

北は北海道から南は沖縄に至るまで日本全国に試験地(表-1)を設定し、 N_2O フラックスと CH_4 吸収フラックス観測を行った。 CH_4 ・ N_2O のフラックス観測はクロズドチャンバー法を用いて測定した。ガスフラックスはHutchinson & Mosierの式²⁾あるいは直線回帰式により算出した。ガスサンプリングと同時に気温、地温(5、15cm)を測定した。測定間隔は月1回、一日1回を基本とした。

表-1 試験地一覧

都道府県	
北海道	北大天塩演習林、雨竜演習林、苫小牧演習林、望来、静内、層雲峡、羊ヶ丘、簾舞、定山溪 白旗山
岩手県	安比高原
秋田県	田沢湖、阿仁向山
茨城県	北茨城、加波山、筑波山、常陸太田
長野県	大弛峠
岐阜県	御嶽、各務原
愛知県	瀬戸演習林、稲武演習林、小原村、名古屋大構内
広島県	東広島
熊本県	鹿北
沖縄県	南明治山

(2) 土壌内CH₄移動モデルの構築

土壌の深さ別単位時間当たりのメタン酸化速度、メタン移動量を考慮したモデルを作成し、年間メタン酸化量推定をおこなった。モデルに使用したパラメーターは、地温・メタン酸化活性 (b-value値)・気相率・ガス拡散係数・温度依存性パラメータ (Q_{10}) である。このモデルを用いて深さ別メタン吸収量と、温度上昇およびCH₄濃度上昇に対するCH₄フラックスの変化を推定した。

(3) メタンフラックス制御要因の探索

東大瀬戸演習林 (SET、標高 630m、弱乾性褐色森林土、観測期間の平均気温は 15.7°C)、名大稲武演習林 (INB、標高 1010m、適潤性褐色森林土、同平均気温は 14.4°C)、岐阜県益田郡小坂町の落合国有林 (OSK、標高 1350m、適潤性褐色森林土、平均気温は 13.5°C) の各試験地において、月に一度 (測定期間は 2000 年 8 月~12 月および 2001 年 5 月~12 月) メタンフラックス観測を行い、土壌のサンプリングを行った。採取した土壌は常法により pH、水分量、仮比重、三相組成、微生物バイオマス、全炭素および窒素量、アンモニア・硝酸態窒素量、水溶性有機炭素量、水溶性土壌微量元素を測定した。室内培養実験を行い、土壌抽出水および塩化アルミ水溶液が土壌中のメタン酸化におよぼす影響を調べた。

(4) 森林火災跡地におけるメタンフラックスの観測

岐阜県各務原市の広葉樹二次林内 (35° 26'N、136° 53'E、標高 123m) の森林火災跡地 (森林火災は 2002 年 4 月 5 日に発生し、500ha が消失した) と同一林分内の非焼失地に 3 個ずつのチャンパーを設置し、フラックスの観測を行うとともに 0-5cm と 5-10cm の土壌を採取し、(3) と同様の土壌分析を行った。

(5) N₂O生成と流域NO₃濃度の関係

関東地方 (多摩、一之瀬) および琵琶湖周辺 (梓川、加河川、板名古) の 5 地域の森林林床に一集水域当たり 10~15箇所のチャンパーを設置し、N₂Oフラックスを測定するとともにデータロガー付き温度計により地温を一年間モニタリングした。それぞれの森林集水域から流出する渓流水のNO₃濃度をイオンクロマトグラフにより測定した。四つの試験地 (梓川、加河川、一之瀬、多摩) において表層および深部から採取した土壌を抽出し、土壌中のNO₃濃度の鉛直分布を測定した。二つの試験地 (梓川、加河川) の表層 (A0層直下~5cm) の土壌を用い、暗所25°Cで培養実験を行った。4mmの篩にかけた生土壌50gに 2 段階の濃度の硝酸アンモニウム溶液を加え、対照には純水を同量加えた。低窒素添加区はヨーロッパの大気汚染地域の1週間分の窒素負荷量、高添加区は石塚らの実験³⁾に従った。それぞれ最終的な土壌水分量が最大容水量の60%になるよう調整した。約24時間後に密栓し、N₂O放出速度の測定を行った。

4. 結果・考察

(1) CH₄フラックスについて

メタンフラックスの観測結果を表-2に示す。吸収フラックス観測期間の平均吸収速度は、0.14 (沖縄・南明治山) ~4.97 mg C m⁻² d⁻¹ (加波山広葉樹林) の範囲を示した。北海道の観測値の平均値は1.57±0.85 mg C m⁻² d⁻¹と本州以南の観測値2.13±1.21 mg C m⁻² d⁻¹よりも低く、低湿・平坦で未熟な土壌が広がる北海道においては、吸収量が少ないと考えられる。冬季の冠雪期間のフラックスを無視できるとすると、年間吸収量は本州以南と比較して有意に小さかった (p<0.001)。今後は冠雪期間や温度依存性を考慮して、年間吸収量を推定する必要がある。

表-2 各調査地点のフラックス観測結果

調査地点		(mgC m ⁻² d ⁻¹)			
		最小吸収 フラックス	最大吸収 フラックス	平均値	SD
天塩	針葉樹	0.50	1.49	0.85	0.26
天塩	広葉樹	0.13	1.31	0.53	0.33
天塩	針葉樹	0.44	2.20	1.22	0.48
天塩	広葉樹	0.55	1.10	0.80	0.19
雨竜	針葉樹	-0.34	2.26	0.67	0.70
雨竜	広葉樹	0.09	1.59	0.77	0.48
望来	広葉樹	0.88	2.29	1.67	0.40
苫小牧	針葉樹	0.93	2.63	1.67	0.81
苫小牧	広葉樹	1.05	1.74	1.31	0.38
苫小牧	広葉樹	0.57	1.76	1.25	0.36
苫小牧	広葉樹	0.73	1.62	1.13	0.28
静内	広葉樹	1.15	2.60	1.64	0.46
層雲峡		1.92	2.98	2.20	0.40
定山溪		1.08	1.43	1.30	0.12
簾舞		3.12	4.28	3.69	0.56
羊が丘 1		1.99	4.31	3.10	0.64
羊が丘 2		1.59	3.16	2.49	0.50
羊が丘 3		1.65	2.45	1.93	0.30
安比		1.11	2.51	1.74	0.46
田沢湖		1.16	2.81	1.80	0.49
阿仁向山		0.62	0.98	0.77	0.15
檜枝岐		-0.56	1.56	0.52	1.06
小川学参 1		0.05	3.95	1.94	0.95
小川学参 2		2.92	4.74	3.82	0.54
小川学参 3		0.85	4.38	3.22	1.15
小川学参 4		2.87	4.19	3.39	0.49
常陸太田 1		1.51	3.17	2.39	0.67
常陸太田 2		1.14	1.36	1.24	0.10
筑波山		0.59	2.24	1.33	0.54
加波山 1		2.26	7.86	4.97	1.64
加波山 2		2.18	7.05	3.49	1.30
基崎		1.80	3.46	2.66	0.63
大弛 1		1.60	2.77	2.04	0.35
大弛 2		1.31	3.20	2.24	0.54
御嶽		1.53	3.15	2.03	0.43
瀬戸		1.01	2.04	1.46	0.29
稲武		2.39	5.30	3.36	0.84
小原		2.04	4.04	2.90	0.86
名大構内		0.14	1.55	0.67	0.55
各務原		1.52	6.41	3.94	1.96
広島		0.35	0.81	0.58	0.23
鹿北		0.90	2.34	1.72	0.44
沖縄		0.00	0.41	0.14	0.19

(2) 土壌内CH₄移動モデル

モデルで計算された値は、実際のフラックス観測と適合する場合 (n=10~12) とそうでない場合 (n=5~7) が認められた。適合がうまく行かない場合は、すべてメタン吸収フラックスを過小評価しており、培養実験をおこなった日がサンプル採取日から2ヶ月以上経過していた。この間に土壌に何らかの変化がおきて、メタン吸収速度が低下したと考えられた。したがって、今後この方法を用いて評価を行う場合は、サンプル採取後できるだけ速やかに培養実験を行う必要がある。表層5cmのb-value値は年間平均CH₄フラックスと良好な相関をしめした(図-1)。CH₄吸収フラックスが大きい加波山等では、表層5cmのメタン吸収活性が高く、日本の森林土壌が比較的CH₄吸収フラックスが大きい原因として、これらの表層5cmの活性が高いことがあげられる。上記のモデルを用いて、年平均地温の上昇(2℃および4℃)および大気メタン濃度上昇(+0.2, +1.2, +2.2ppmの3通り)の2つの温暖化シナリオと、それらが同時に起こった場合(2℃上昇と0.2ppm増加、および2℃上昇と1.2ppm上昇)に対する土壌の反応を解析した。その結果、温度の上昇はほとんど吸収速度に影響を与えず、大気メタン濃度の上昇に対しては吸収速度が増加する結果が得られた(図-2)。この結果から、メタン濃度の上昇をとまなわない温暖化が起こった場合、メタン濃度を低下させるような土壌反応はおこらないことが予測される。

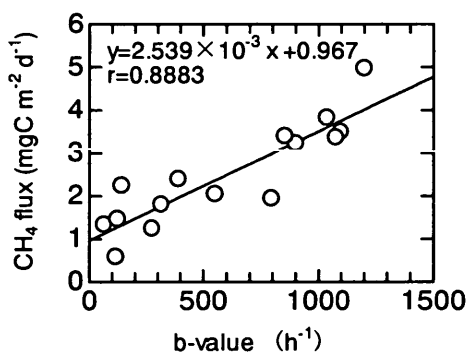


図-1 表層土壌のメタン酸化能とメタン平均フラックスの関係

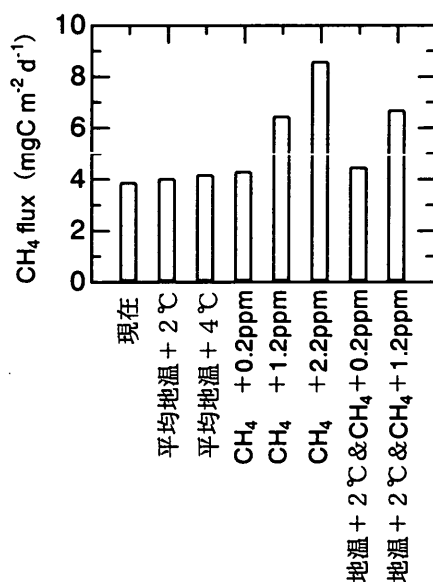


図-2 各温暖化シナリオに対する土壌のメタン吸収フラックスの変化予測

(3) メタンフラックス制御要因の探索

3地点の中では、INB (4.27 mg CH₄ g⁻¹ d⁻¹) が一番高い吸収量を示し、次いでOSK (2.80 mg CH₄ g⁻¹ d⁻¹)、SET (2.11 mg CH₄ g⁻¹ d⁻¹) の順であった。温度とメタン吸収量の関係については過去の研究で強い相関性と顕著な季節変化が報告されているが、今回の結果ではINBにおいてのみメタン吸収量と温度($r = 0.71$, $p = 0.02$)および地温($r = 0.65$, $p = 0.04$)との間に相関が認められた。2000年12月にINBとOSKにおいて気温が氷点下まで下がったが、メタン吸収量にそれほど大きな変化は認められず、気温が0度以下になってもメタン酸化は行われていた。水分量とメタン吸収量との間に相関は認められなかった。アンモニアは土壌中のメタン酸化に影響すると考えられてい

るが、本研究では土壌中のアンモニア濃度とメタン吸収量との間に相関は認められなかった。

INB の 0-5cm からの抽出水以外は、蒸留水を添加した時に比べて有意に吸収量を減少させた ($p < 0.01$)。さらにメタン吸収量の低かった層からの抽出水は最大のメタン吸収量を示した層の抽出水よりも有意に吸収量を減少させた。この結果より、培養実験で吸収量の少なかった層からの抽出水はメタン酸化を抑制するはたらきがあることが示唆された。また、メタン吸収量と CN 比との間に正の相関が認められた ($r = 0.64, p < 0.001$) (図-3) ことから、何らかの阻害物質が有機物分解によって生成され鉍質土壌中に存在しているのではないかと考えられる。

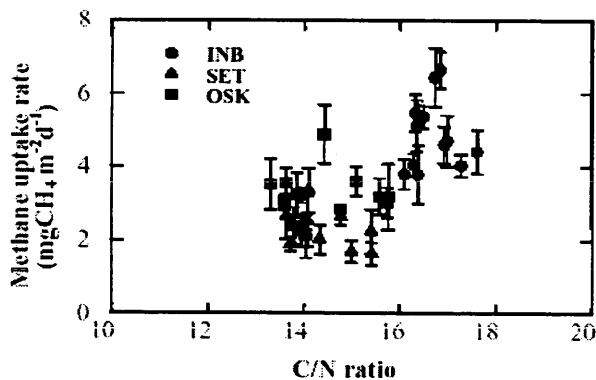


図-3 CN 比とメタン吸収フラックスの関係

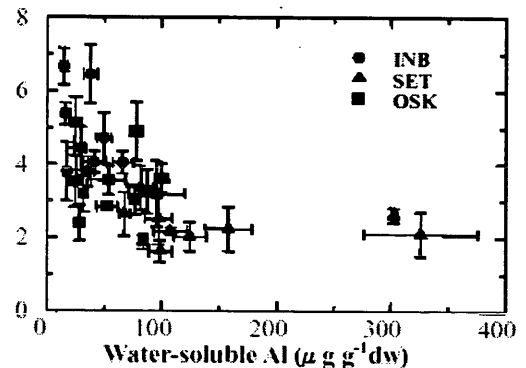


図-4 水抽出 Al とメタンフラックスの関係

土壌中の水溶性 Al 濃度は SET が一番高く ($145.0 \mu\text{g g}^{-1}$)、次いで OSK ($62.9 \mu\text{g g}^{-1}$)、INB ($33.1 \mu\text{g g}^{-1}$) の順であった。これはメタン吸収量が低い順番と一致し、メタン吸収量と水溶性 Al 濃度の間に負の相関が認められた ($r = 0.48, p = 0.007$) (図-4)。室内培養実験においても、1mM と 5mM の Al 水溶液がメタン吸収量を有意に抑制し、Al 濃度が増加するに伴い抑制量も増加する傾向が確認された ($p < 0.01$)。この結果より、水溶性 Al がメタン吸収量を制御する重要な物質のひとつであるという可能性が示された。この Al のメタン酸化菌におよぼす影響を調べた研究は過去に見られない新知見である。

本研究で得られたデータを用いて、目的変数をメタンフラックス、説明変数に土壌水分量、気温、地温、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 量、CN 比、水溶性有機炭素量、水溶性 Al 量 (対数) を使用して除外 F 値 2.00 による変数減少法で重回帰分析を行った所、下の式が得られた。

$$F = 0.0390 * \text{Tem} + 0.3765 * \text{CN} - 0.6334 * \log \text{Al} - 0.5937 \quad (R^2=0.6318 \quad p < 0.0001)$$

但し、F: メタンフラックス、Tem: 気温、CN: CN 比、logAl: 水溶性 Al 量(対数)である。

この結果より、フラックスの制御要因としては気温、CN 比、水溶性 Al 量の重要度が高い事が示された。それぞれの標準回帰係数は Tem=0.2725、CN=0.4287、Al=-0.4470 であった。つまり制御要因としての重要性は Al 量が一番高く、次いで CN 比、気温であることが確認された。

(4) 森林火災がメタンフラックスに与える影響

森林火災跡地は非焼失地と比較してメタン吸収フラックスが低かった。火災跡地の水溶性 Al 濃度は非焼失地の濃度に比べて大きく、火災によって増加した Al によってメタン酸化が阻害されていることが原因だと考えられた (図-5)。

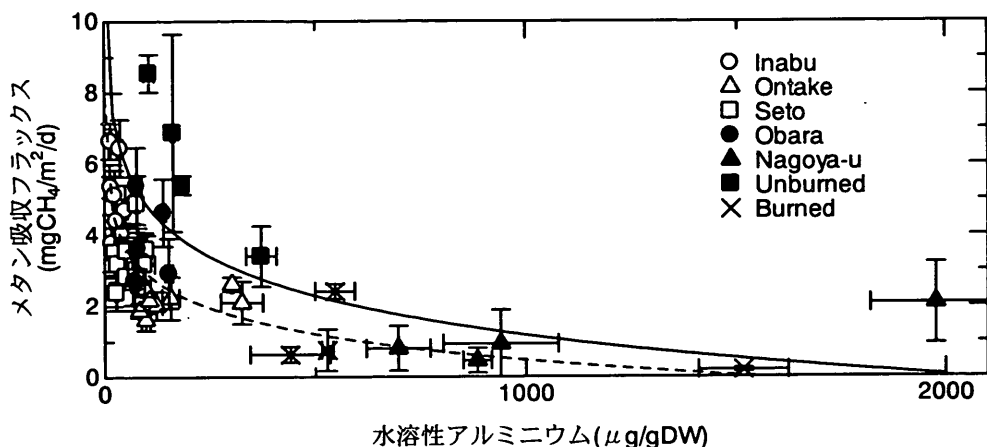


図-5 森林火災跡地と非燃焼地における水溶性アルミ濃度とメタン吸収フラックスの関係

表-3 本研究と他地域のN₂Oフラックス観測結果

	平均フラックス ($\mu\text{gN m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	年間発生量 (kgN ha^{-1})	全観測数	有意なフラックス		
				回数	全体に対する%	
アメリカ		0.01				
アメリカ		0.03-0.09				
アメリカ		0.02				
アメリカ		0.23				
オーストリア		0.08				
スウェーデン		0-0.16				
ドイツ		5.60				
ドイツ		3.00				
ドイツ		7.30				
梓川		0.42				
板名古		0.20				
加河川		0.11				
一之瀬		0.04				
多摩		0.9, 0.7				
安比	29.5	0.11 ^a	65	34	52	
田沢湖	50.7	0.19 ^a	70	27	39	
小川学参	スギ林	32.6	0.12 ^a	18	10	56
	ブナ林	103.3	0.38 ^a	21	7	33
加波山	広葉樹	47.9	0.17 ^a	12	8	67
	ヒノキ林	30.0	0.11 ^a	12	6	50
大弛	シラベ林	12.2	0.04 ^a	15	4	27
	カラマツ林	8.4	0.03 ^a	15	1	7
稲武		10.9	0.04 ^a	70	26	37
瀬戸		36.0	0.13 ^a	70	37	53
広島		41.4	0.15 ^a	15	5	33
鹿北		26.9	0.10 ^a	30	9	30
沖縄		15.1	0.06 ^a	6	2	33

^a複数回の観測結果の平均値を単純に年ヘクターあたりに換算した値

(5) 渓流水NO₃濃度とN₂Oフラックスについて

N₂Oフラックスは地温とともに指数関数的に増加した。これは欧米ではあまり認められない傾向であり、水分条件が生物活性の制限要因になりにくい湿潤モンスーンアジア気候帯の特徴であると推察される。地温モニタリングデータを当てはめて年間放出量を推定した結果、各地域からの放出量は0.03~0.9 kg N ha⁻¹ yr⁻¹と一桁以上も異なり、集水域レベルでの空間的変動性がきわめて大きかった(表-3)。窒素飽和状況にあると考えられる多摩では従来の温帯林での観測値(但し、ドイツの高い観測値を除いたものとの比較において)よりもかなり大きいことが明らかになった。大気からの窒素負荷量が互いに変わらないと考えられる琵琶湖周辺域の集水域間でN₂Oフラックスに大きな違いが認められたことから、流域レベルのN₂O放出にとって大気からの窒素負荷の大小は決定的な要因とはなっていないと推察される。しかし、集水域渓流水のNO₃濃度とN₂Oフラックスの間にきわめて高い正の相関が認められた(図-6)。高N₂Oフラックスの森林ほど土壌のNO₃含量が高く、また深部にまでNO₃が到達しているという対応関係が認められた。N₂Oフラックスの大小は渓流水NO₃濃度と深く関与し、少なくとも同程度の降水量の地域に関する限り、渓流水中NO₃濃度は集水域レベルのN₂Oフラックスの指標としてきわめて有効であることが判明した。また、窒素添加による培養実験の結果、高N₂Oフラックス地ほどN₂O放出が大きく、より低濃度の窒素添加で促進された(図-7)。これは、大気からの窒素負荷の増大に対して、高N₂Oフラックス地が鋭敏に反応することを示唆している。N₂Oフラックスの変化予測として窒素飽和現象のシナリオを想定した場合に、こういった過去の履歴を考慮する必要があることが明らかになった。

図-6の流出量の回帰直線の勾配から、森林の窒素過剰に伴うN₂Oの放出係数emission factorは3.1%と見積もられた。これらの結果を元に、ある森林集水域からの年間N₂O放出量Mを推定する式を考案した。

$$M \text{ (g N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}\text{)} = 0.031 \times 10000 \text{ (m}^2 \text{ ha}^{-1}\text{)} \times C \times D$$

ここで、Cは渓流水のNO₃濃度(g N m⁻³)、Dは降水量から蒸発散量を引いた年間の水流出量(m y⁻¹)である。平水時のCの変動は大きくないため、平水時に一回サンプリングを行えば、Mを推定することが可能である。

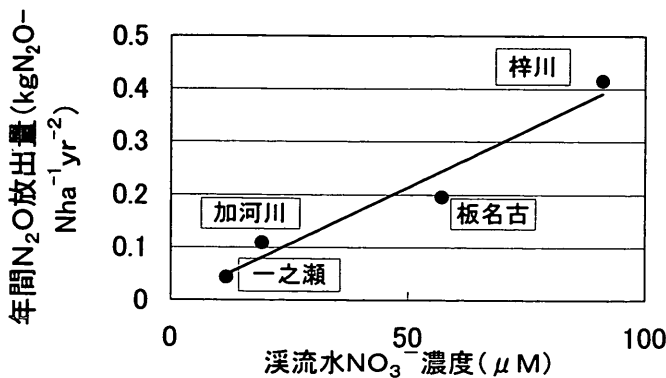


図-6 各地域における年間N₂O放出量と
渓流水NO₃⁻濃度の関係

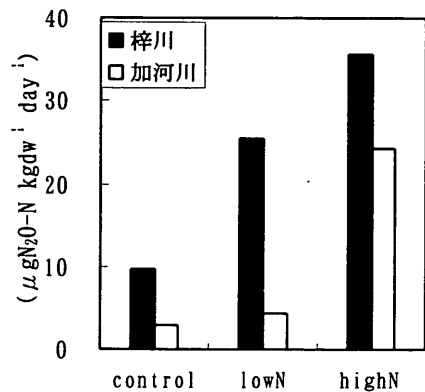


図-7 土壌のN₂O生成速度に対する
窒素(NH₄NO₃)の添加効果

但し、多くの試験地において N_2O フラックスは検出限界付近の小さい値を示し、フラックス値の精度と評価に関して課題も残した。

5. 本研究より得られた成果

CH_4 吸収フラックスは北海道で $1.57 \pm 0.85 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と低く、本州以南は $2.13 \pm 1.21 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と高かった。従来から言われていた土壌の気相率よりも表層土壌のメタン酸化能の方を指標にした方がフラックスの予測には適切であると考えられた。東海地方3点の観測結果と室内実験から、 CH_4 吸収に対しアルミニウムが抑制効果を持ち、アルミニウム濃度とCN比によってフラックスが影響を受けていることが示唆された。推定された年間 N_2O 発生量は $0.03 \sim 0.8 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の範囲で大きな地域間差があったが、流域の渓流水中の硝酸態窒素濃度と N_2O フラックスの間には明らかな正の相関が認められた。森林からの NO_3^- 流出量に対する N_2O の放出割合（放出係数 emission factor）は3.1%と見積もられ、ある森林集水域からの年間 N_2O 放出量を渓流水の NO_3^- 濃度と年間の水流出量から推定する式を考案した。

6. 引用文献

- 1) IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis (Houghton et al. eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881p (2001)
- 2) Hutchinson, G.L. and Mosier, A.R.: Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 311-316 (1981)
- 3) 石塚成宏・阪田匡司・谷川東子・石塚和裕：落葉広葉樹林における N_2O 生成とその空間的異質性, *日本林学会誌*, 82(1), 62-71 (2000)

7. 国際共同研究等の状況

特記事項なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

<学術誌（査読あり）>

- ①Ishizuka, S., T. Sakata, and K. Ishizuka: Methane oxidation in Japanese forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 32, 769-777(2000)
- ②Tamai, N., C. Takenaka, S. Ishizuka, and T. Tezuka: Effect of soil air volume change on CH_4 consumption in Brown Forest Soil., *J. For. Res.*, 6, 311-313 (2001)
- ③Yoh, M., E. Konohira and K. Yagi: Regional distribution of natural stream nitrate in central Japan. *Water, Air, & Soil Pollut.*, 130, 655-660(2001)
- ④Yoh, M.: Soil C/N ratio as affected by climate: an ecological factor of forest NO_3^- leaching. *Water, Air, & Soil Pollut.*, 130, 661-666(2001)
- ⑤Konohira, E., M. Yoh, J. Kubota, K. Yagi, H. Akiyama: Effects of riparian denitrification on stream nitrate. -Evidence from isotope analysis and extreme nitrate leaching during rainfall-. *Water, Air, & Soil Pollut.*, 130, 667-672(2001)

⑥波多野隆介・岡崎正規・藤井國博・楊 宗興・谷山一郎・乗木新一郎・木村真人：環境負荷と物質循環－モニタリング・モデリング－，日本土壤肥料学雑誌，72(6)，824-832 (2001)

⑦Tamai, N., C. Takenaka, S. Ishizuka, and T. Tezuka: Methane flux and its controlling factor in soils of three equal-aged Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forests in central Japan, Soil Biol. Biochem., 35, 633-641(2003)

<学術誌 (査読なし) >

①楊 宗興、吉岡崇仁、他 39 名：集水域の生物地球化学：その意義と展望，陸水学雑誌，64, 49-79 (2003)

<書籍>

①楊 宗興・木平英一・碓井敏宏・武重祐二・西尾友宏・西岡三雄：渓流水の富栄養化と N₂O 発生．多摩丘陵の自然と研究，土器屋他編著，けやき出版，19-32(2001)

②楊 宗興：集水域系のN₂O発生，「環境負荷を予測する－モニタリングからモデリングへ－」p241-p258. 長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規編，博友社(2002)

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

①玉井伸明・竹中千里・石塚成宏・手塚修文：日本土壤肥料学会 (2000) 「踏圧が森林土壌のメタン吸収に与える影響」

②森下智陽・上出桂子・波多野隆介：日本土壤肥料学会 (2000) 「土壌および植生の違いが森林土壌 CH₄ 吸収におよぼす影響」

③玉井伸明・竹中千里・石塚成宏・手塚修文：日本土壤肥料学会 (2001) 「標高の異なるヒノキ林土壌のメタン吸収能」

④楊 宗興：日本土壤肥料学会・シンポジウム「環境負荷と物質循環－モニタリング・モデリング－」 (2001) 「集水域系における N₂O 発生」

⑤楊 宗興・武重祐史・木平英一：日本陸水学会・課題講演「集水域の生物地球化学」 (2001) 「モンズーンアジアの森林における N₂O 発生：説明因子としての渓流水 NO₃⁻濃度」

⑥玉井伸明・竹中千里・石塚成宏・手塚修文：日本土壤肥料学会 (2002) 「同齢ヒノキ林におけるメタン吸収量比較およびその影響要因の解明」

⑦仁科一哉・竹中千里・手塚修文・石塚成宏・松本武：日本林学会 (2003) 「森林火災跡地における CH₄ フラックス」

⑧石塚成宏・阪田匡司・高橋正通・稲垣善之・溝口岳男・澤田智志・芦谷大太郎・五十嵐正徳・馬田英隆・金澤洋一・漢那賢作・小山泰弘・鈴木祥仁・寺澤和彦・豊田信行・橋本哲・室雅道・安田洋・山本博一：日本土壤肥料学会 (2003 年 8 月予定) 「森林伐採が土壌からの温室効果ガスフラックスに与える影響について－予報及び秋田県の事例について－」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

日本林学会奨励賞 (石塚成宏、落葉広葉樹林における N₂O 生成とその空間的異質性、

2002.3.20)

東京大学学位論文（石塚成宏、森林土壌におけるメタンおよび N_2O フラックスに関する研究、2002.10）

（5）一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

なし