

B-5 熱帯アジアの土地利用変化が陸域生態系からの温室効果ガスの発生・吸収量に及ぼす影響の評価に関する研究

(3) 熱帯土壌からの温室効果ガスの発生・吸収要因の解明

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

(研究協力機関・研究者)

独立行政法人農業環境技術研究所

化学環境部 栄養塩類研究グループ

中島泰弘

地球環境部 気象研究グループ

米村正一郎、川島茂人

地球環境部 温室効果ガスチーム

須藤重人、鶴田治雄

インドネシア BIOTROP-GCTE-IC-SEA

ダニエル ムルディヤルソ

インドネシア ボゴール農業大学

イスワンディ アナス

平成11～13年度合計予算額 13,641 千円

(うち、平成13年度予算額 4,237千円)

[要旨] アジア太平洋地域における土地利用の変化によって、炭素・窒素の物質循環や収支、特に温室効果ガスの放出・吸収量が大きく変化して地球温暖化に影響を及ぼしていると推測される。2001年度まで継続調査を行っていたインドネシア・スマトラ島中央部に位置するパシルマヤン試験地において、土地利用の異なる5つの固定試験地で土壌試料を採取し、雨季と乾季における土壌の変化の測定、 $N_2O$ 生成に関与するアンモニア酸化菌、亜硝酸酸化菌、脱窒菌の計数および脱窒活性の測定と、 $CH_4$ 吸収に関与する $CH_4$ 酸化菌数の計数をおこなった。また $CO_2$ 発生量に関係があると考えられる土壌糖量を定量し、 $CO_2$ 発生量と比較をおこなった。さらにパシルマヤン試験地周辺地域27地点において同様にガスフラックスの測定と土壌試料の分析をおこなった。パシルマヤン試験地の分析結果から、硝化過程が $N_2O$ 生成の主過程であるという推論が支持され、硝化速度と $N_2O$ フラックスの間に全球的に通用する関係が見いだされた。アンモニア酸化菌および亜硝酸酸化菌は伐採跡地で検出され、この地点における $N_2O$ フラックスが硝化過程で発生しているという仮定と合致した。これらの硝化が従属栄養細菌によると推定された。これは今までに知られていなかった新しい知見である。脱窒菌の生息数は多くなく、脱窒による $N_2O$ 生成はそれほど重要ではないと考えられた。また27ヶ所の広域調査の結果、硝化速度に対する $N_2O$ 生成速度はAndisols土壌で低いことが明らかになり、そのメカニズムの解明が急がれるとともに、Andisols土壌には新しいエミッションファクターを適用する必要があることが明らかになった。 $CO_2$ フラックスと $CH_4$ フラックスは乾燥・湿潤という熱帯特有のサイクルに大きく影響を受け、パシルマヤン試験地では乾燥による微生物活動の障害が $CO_2$ フラックスと $CH_4$ 吸収フラックスを低下させていると考えられた。パシルマヤン試験地の $CH_4$ 吸収フラックスは土壌の気相率と正の相関があった。しかし、広域調査の結果ではこの傾向は認められず、その原因は特定できなかったが、シロアリの影響が大きいと考えられる。 $CH_4$ 酸化活性と $CH_4$ 酸化菌数の関係は明瞭ではなく、 $CH_4$ フラックスを決定する要

因についてはさらに解析が必要だと考えられた。また、土壌糖量を測定した結果から、土壌中の熱水抽出画分がCO<sub>2</sub>生成に重要な役割を果たしている可能性が示唆された。パシルマヤン試験地のCO<sub>2</sub>フラックスはリター量との相関が高く、CO<sub>2</sub>フラックスを森林のバイオマス量から推定する手法に可能性を見いだした。しかし、この関係は広域調査の観測にはあてはまらず、今後さらなる研究が必要と考えられる。

[キーワード] 温室効果ガス、土地利用変化、熱帯アジア、土壌微生物、硝化活性

## 1. はじめに

熱帯アジア地域を中心としたアジア太平洋地域では、人口の急増とともに森林が消失して農耕地などになるという土地利用変化が急速に進行している。特に熱帯林などが伐採や焼き畑農業および森林火災などにより著しく減少しているが、消失後の土地利用形態については十分に把握されていない。また、その土地利用の変化によって、土壌を含めた生物圏と大気圏との間の炭素・窒素の物質循環や収支、特に温室効果ガスの放出・吸収量が大きく変化して地球温暖化に影響を及ぼしていると推測される。しかし、IPCCやIGBPでも指摘されているように、熱帯アジアを中心としたアジア太平洋地域ではこれらの調査研究がなされておらず、アジア地域の研究者と共同でこれらの研究を実施することが緊急に要求されている。平成8年から10年にかけての環境庁プロジェクトでは、メタンおよび亜酸化窒素のフラックス決定因子が推定され、森林伐採による温室効果ガス発生に対する影響は伐採時がもっとも大きく、伐採によって引き起こされる窒素無機化および硝化活性の増大がN<sub>2</sub>Oの発生を増大させること、植生の更新が温室効果ガスの発生を減少させることが明らかになった。平成11年度から平成13年度の3年間ではこれらの研究をより深化し、各土壌の反応を生物的、生化学的に明らかにし、より理論的な検証をおこなうことを主目的とする。

## 2. 研究目的

平成8～10年度までの成果では、N<sub>2</sub>Oは主として硝化過程によって発生していること、メタン吸収は表層5cmの気相率に大きく影響を受けること、CO<sub>2</sub>発生量は微生物の活性によって決定されている可能性が高いことなどが明らかになった。これらの結果を踏まえて、1. 雨季における脱窒過程によるN<sub>2</sub>O生成は無視できるほど小さいのか 2. メタン吸収活性の高い部位がなぜ最表層ではなく次表層に存在するのか 3. 固定試験地で得られている値が一般性をもっているのか などの課題が提起された。また、今までの土壌サンプリングはプロットごとに採取した時期が異なったため、時期によって土壌の差があった場合には今までのデータでは十分であるとはいえなかった。そこで平成11～13年度ではこれらの課題を解決するために、1. パシルマヤン試験地において同じ時期に土壌サンプリングを行い、今までの分析値と比較検討すること 2. 雨季と乾季における土壌の性質の違いを明らかにし、雨季の窒素循環がN<sub>2</sub>Oの発生に貢献する過程を推測すること 3. 微生物数を計測し、物質循環過程を推測すること 4. 炭素循環について今まで行ってきた分析よりもさらに細かく物質量を把握して物質循環を推定すること 5. 広域調査を行い、固定試験地におけるメカニズムが周辺地域に適合するかどうかを検証すること 以上5点について研究を推進した。

### 3. 研究方法

#### (1) パシルマヤン試験地土壌の分析

インドネシア・スマトラ島ジャンビ州に設置したパシルマヤン試験地の土地利用の異なる5つの固定試験地 (P1、P2 一次林; L1、伐採2年目の伐採跡地; L2、択伐林; R、ゴム林; Op、伐採5年目の伐採跡地)において平成11年9月に3日間にわたって土壌試料および土壌円筒試料を採取し、土壌の化学性、物理性、生物・生化学性の分析と、土壌円筒試料の培養によるガス生成ポテンシャルについて測定した。試験地の詳細については、本報告書のB-5(1)を参照されたい。

#### (2) 土壌の季節変動把握

乾季と雨季によって土壌中の物質循環、特に窒素の循環が変化しているかを検証することにある。特に雨季における脱窒の有無は重要であり、今後の研究に重要な意味をもっている。そこで、2000年3月、6月、10月、12月の雨季3回乾季1回のサンプリングをおこない、各種分析をおこなった。土壌物理性・化学性の分析項目はpH、全窒素、有機炭素、BrayIリン、交換性塩基量(原子吸光光度法)、交換性塩基容量、含水比、粒径組成(ピペット法)、仮比重、有効間隙水量、総孔隙量、土壌硬度である。土壌微生物の計数は、細菌数(希釈平板法)、糸状菌数(Martinの寒天培地)、土壌呼吸量である。

#### (3) 微生物数の計数

硝化過程と脱窒過程をおこなう微生物数(アンモニア酸化菌、亜硝酸酸化菌、脱窒菌さらに従属栄養硝化細菌)をMPN法により計測し、 $N_2O$ 生成との関係を比較検討した。脱窒活性をアセチレンブロック法によって測定した。また独立栄養的な硝化の阻害剤であるDCDを添加して培養し、 $N_2O$ の生成を測定することにより、従属栄養的な硝化の検証を試みた。1999年10月の試料についてはメタン酸化細菌数を測定した。

#### (4) $CO_2$ 生成に関する物質量の把握

2000年9月には $CO_2$ 発生量に関係があると考えられるリター量を定量し、 $CO_2$ 発生量と比較をおこなった。1999年10月の試料について土壌糖の定量をおこなった。土壌糖の測定は次のようにおこなった。3段階加水分解抽出法を用いて土壌からヘミセルロース画分とセルロース画分に分離し、それぞれの画分に対してアンスロン法によりヘキソース量を、オルシン法によりペントース量を定量し、その含量を土壌中の全糖量として $mg\ g^{-1}$ で表した。

#### (5) 広域調査

今まで観測をおこなってきたパシルマヤン試験地で推測されたメカニズムが、周辺地域にも当てはまるかどうかを検証するために、2001年9月にジャンビ州内の異なる土地利用形態をもつ合計27地点(図-1)においてガスサンプリングと土壌サンプリングをおこない、フラックスの計測と土壌分析をおこなった。フラックスは各地点直径25cm、高さ15cmのポリ塩化ビニール製の円筒形チャンパー7つを用いて測定した。測

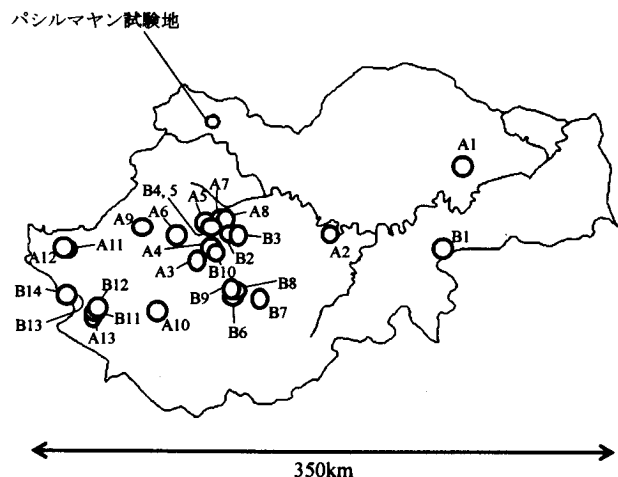


図-1 広域調査位置図

定時には土壌試料を採取し、pH、全炭素・窒素量、微生物バイオマス炭素・窒素量、無機態窒素量（アンモニア態窒素、硝酸態窒素量）、窒素無機化速度、含水比を測定した。分析用試料とは別に700mLの土壌を採取して、仮比重、土壌の固相、液相、気相率を算出した。固相率の算出には、固相重を珪砂の比重2.6で割った値を用いた。50cm四方のリターを3反復採取し、重量を測定した。これらの測定値とフラックスとの比較をおこなった。地温、気温は温度計（佐藤工業、SK-2000MC）によって計測した。

#### 4. 結果・考察

##### (1) パシルマヤン土壌の分析結果について

土壌化学性、土壌物理性、土壌生物・生化学性の結果をそれぞれ表-1、2、3に示す。

表-1 パシルマヤン土壌の化学性

	pH	含水比		N	C/N	CEC	Ca	Mg	K	Na	Bray II P	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	
		kg kg <sup>-1</sup>	(%)											cmol(-) kg <sup>-1</sup>
P1	0-5	4.38	0.15	2.12	0.11	19.1	6.86	0.08	0.03	0.05	0.01	3.04	7.85	3.28
	5-10	4.67	0.15	1.66	0.08	21.8	7.97	0.02	0.03	0.03	0.00	2.61	5.82	1.93
	10-15	4.48	0.15	1.39	0.06	22.0	8.98	0.04	0.02	0.03	0.00	2.83	6.68	2.15
P2	0-5	3.91	0.17	2.14	0.13	16.0	11.04	0.01	0.04	0.07	0.01	2.49	7.23	1.62
	5-10	4.13	0.17	1.02	0.08	13.1	9.50	0.03	0.03	0.05	0.00	2.92	6.93	1.53
	10-15	4.32	0.20	0.93	0.08	12.4	9.41	0.03	0.03	0.04	0.00	3.52	8.09	1.85
L1	0-5	4.48	0.21	2.25	0.17	13.1	11.46	1.00	0.39	0.12	0.00	5.73	7.77	1.79
	5-10	4.34	0.21	1.29	0.11	12.1	10.93	0.32	0.20	0.08	0.00	2.93	8.07	1.80
	10-15	4.36	0.22	1.08	0.09	11.7	9.22	0.22	0.13	0.09	0.00	2.80	7.74	1.81
L2	0-5	3.73	0.16	2.30	0.14	15.9	10.11	0.03	0.05	0.07	0.00	5.04	6.02	1.65
	5-10	3.99	0.12	1.19	0.09	13.9	8.57	0.04	0.03	0.05	0.00	6.52	5.70	1.63
	10-15	4.16	0.13	0.85	0.07	12.8	8.06	0.05	0.03	0.04	0.00	4.33	4.71	2.79
R	0-5	4.43	0.23	3.35	0.22	15.5	14.08	0.40	0.25	0.16	0.01	9.83	10.62	1.71
	5-10	4.33	0.26	1.82	0.13	14.0	10.78	0.05	0.07	0.10	0.00	4.80	11.12	1.41
	10-15	4.33	0.28	1.50	0.11	13.5	10.17	0.05	0.07	0.07	0.00	5.05	11.46	1.47
Op	0-5	4.59	0.40	1.95	0.19	10.0	24.67	0.61	0.57	0.22	0.00	3.91	10.48	1.73
	5-10	4.50	0.47	1.92	0.20	9.7	25.33	0.23	0.26	0.14	0.00	4.74	9.51	1.93

\*data with the sample on Oct. 1999

表-2 パシルマヤン土壌の物理性

	Solid	Air	Liquid	B.D.	WFPS	
						(%)
P1	0-5	36.7	48.6	14.7	1.00	23.2
	5-10	41.1	42.5	16.4	1.11	28.0
	10-15	46.1	35.2	18.7	1.24	34.8
P2	0-5	26.8	55.6	17.6	0.75	24.1
	5-10	38.1	43.2	18.8	1.05	30.5
	10-15	42.9	33.6	23.6	1.17	41.5
L1	0-5	28.9	47.0	24.1	0.78	34.2
	5-10	39.8	34.5	25.7	1.11	43.2
	10-15	47.1	22.7	30.2	1.28	57.9
L2	0-5	28.8	52.9	18.3	0.82	25.7
	5-10	35.3	48.2	16.5	1.02	25.5
	10-15	38.7	44.9	16.4	1.11	26.7
R	0-5	29.2	47.5	23.3	0.80	33.0
	5-10	33.6	36.6	29.9	0.95	45.0
	10-15	33.4	34.0	32.7	0.95	49.2
Op	0-5	26.3	42.1	31.6	0.76	42.9
	5-10	36.0	12.7	51.2	1.01	80.1

\*data with the sample on Oct. 1999

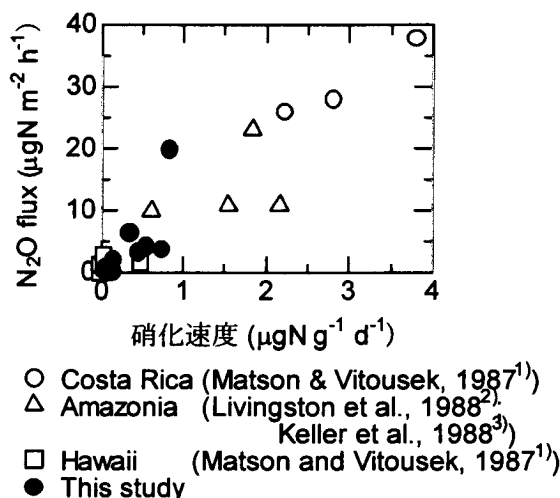


図-2 パシルマヤン試験地で得られた硝化速度—N<sub>2</sub>O フラックスの関係と他の観測

表-3 パシルマヤン土壌の生物・生化学性

		Biomass C	Biomass N	mineralization	Nitrification	Pase	Root	Litter**	NH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	Denitrifier	CH <sub>4</sub>
		( $\mu\text{gC/g}$ )	( $\mu\text{gN/g}$ )	( $\mu\text{g/g/d}$ )	( $\mu\text{g/g/d}$ )	( $\mu\text{mol/g/hr}$ )	(g/100mL)	(g/m <sup>2</sup> )	(cell/g)	Oxidizer	Oxidizer	Oxidizer
P1	0-5	936	55.1	0.26	0.027	46.3	0.66	972	35	58	8	6800
	5-10	668	19.6	0.21	0.011	43.9	0.88		35	58	15	27000
	10-15	822	40.4	0.17	0.008	38.0	0.43		35	58	15	140000
P2	0-5	770	78.7	0.52	0.256	96.3	0.84	欠測	36	59	9	46000
	5-10	409	49.8	0.32	0.179	47.7	0.53		35	59	130	49000
	10-15	558	61.4	0.13	0.023	40.6	0.40		36	60	17	49000
L1	0-5	508	49.2	0.43	0.409	61.1	1.25	838	182	999	41	140000
	5-10	317	31.3	0.22	0.177	31.6	0.53		37	1010	159	70000
	10-15	370	34.0	0.16	0.115	37.1	0.20		37	139	27	21000
L2	0-5	712	73.0	0.43	0.303	44.5	0.96	1518	35	59	20	7800
	5-10	592	78.5	0.33	0.181	22.6	1.22		34	56	195	6100
	10-15	448	60.9	0.22	0.162	18.1	0.65		34	57	193	17000
R	0-5	628	53.5	0.47	0.266	54.0	0.92	1221	38	63	2	40000
	5-10	470	42.0	0.24	0.207	39.5	0.71		38	64	48	49000
	10-15	349	41.4	0.23	0.204	28.6	0.18		39	65	31	4000
Op	0-5	221	29.1	0.29	0.006	32.4	0.76	833	43	71	3908	17000
	5-10	640	N.D.	0.26	0.086	27.6	0.09		44	73	6297	2000

\*data with the sample on Oct. 1999 \*\*data on Sep. 2000

これらの結果は、平成8年～平成10年に測定した分析結果とやや異なり、サンプリング時期の違いによる土壌の性質の差があるか、あるいはサンプリング誤差による値のばらつきかなどの理由が考えられる。N<sub>2</sub>Oフラックスはサンプリング時の硝化速度と正の相関を示し、その傾向は世界の他の土壌における観測結果とほぼ同一直線上に位置していること(図-2)、メタン吸収フラックスは、最初の1年間では気相率との相関が高くなかったが、5年間のメタン吸収フラックスは土壌の気相率と正の相関があった(図-3)。

土壌円筒試料培養実験(表-4)によるとプロットP2の土壌ではメタンは吸収しているが、フラックスの観測結果ではメタンは発生している。これはメタンの発生源が土壌ではなくシロアリであることを示唆している。

(2) 土壌の季節変動

pHは乾季の方が雨季よりも低い傾向にあった(図-4)。可給態リンは雨季の方が乾季より高い傾向

表-4 土壌円筒試料培養実験による各プロットのガス生成ポテンシャル

		CO <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O	
		mgC m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>		μgC m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>		μgN m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
P1	0-5	17.8	1.4	-0.51	0.35	0.17	0.03
	5-10	10.4	2.3	-1.71	0.76	0.05	0.05
	10-15	8.6	0.4	-1.77	0.63	0.03	0.02
P2	0-5	30.3	5.9	-0.44	0.42	0.19	0.09
	5-10	12.5	4.0	-3.50	0.95	0.13	0.15
	10-15	14.0	5.4	-2.84	1.97	0.10	0.12
L1	0-5	28.5	9.1	-0.31	0.22	0.66	0.45
	5-10	16.2	4.7	-1.79	1.57	0.27	0.36
	10-15	8.2	1.5	-1.85	1.17	0.03	0.12
L2	0-5	18.7	7.1	-1.42	1.06	0.66	0.83
	5-10	18.0	9.4	-2.71	2.42	0.03	0.13
	10-15	10.8	0.7	-2.53	1.27	-0.01	0.02
Op	0-5	24.3	9.4	-0.73	0.30	0.17	0.07
	5-10	13.9	1.1	-2.55	0.49	8.02	8.10
R	0-5	18.1	9.9	-0.53	0.54	0.15	0.15
	5-10	12.0	0.8	-3.10	2.21	0.15	0.11
	10-15	9.4	6.8	-2.48	1.58	-1.16	2.24

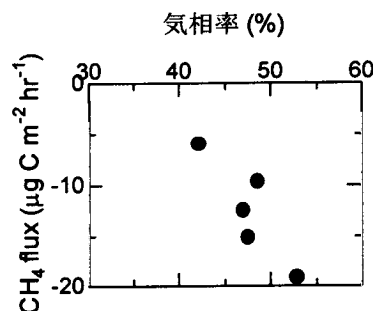


図-3 5年間の平均メタンフラックスと土壌の0-5cmの気相率の関係

が認められた。土壌中の細菌数、糸状菌数は乾季に減少し、雨季に増加する傾向が認められた。雨季のCO<sub>2</sub>フラックスは乾季のCO<sub>2</sub>フラックスよりも大きい傾向が認められることから、乾季にはpHの低下や養分環境の悪化につれて、土壌微生物にとって生育環境が悪くなり土壌呼吸量が減少すると推測された。従って、CO<sub>2</sub>フラックスは乾燥・湿潤というサイクルに大きく影響を受けると考えられた。

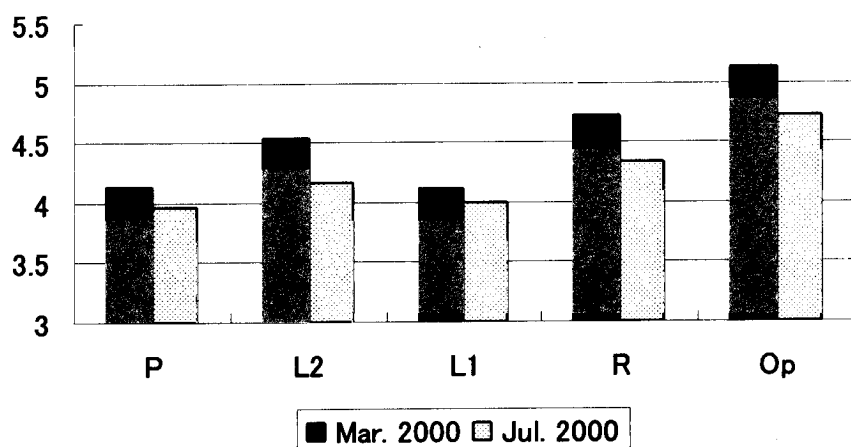


図-4 雨季（2000年3月）と乾季（2000年7月）の土壌pH

### (3) 微生物数の計数

#### ①N<sub>2</sub>O生成に関わる微生物数について

硝化細菌数はアンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌ともにL1地点でもっとも多く、そのほかの地点では測定限界値以下であったが、従属栄養硝化細菌は全地点で検出され、L1 および L2 でもっとも多かった。また脱窒菌数は Op 地点でもっとも多かったものの、全体的に検出限界近い少ない計数であった。

脱窒活性とN<sub>2</sub>Oフラックスとの相関は認められなかった。また、大幅な季節変動も観察されなかった。従属栄養硝化細菌の基質であるクエン酸を加えたところ、N<sub>2</sub>Oの発生量が増加した。また、独立栄養硝化細菌の阻害剤であるDCDを添加してもN<sub>2</sub>Oの発生量の減少は認められなかった（図-5）。硝化細菌がL1地点以外からは認められないこと、従属栄養硝化細菌が全地点から検出されていること、DCDでの阻害が認められないことなどから、本プロットにおけるN<sub>2</sub>Oの発生は主として従属栄養硝化細菌由来であることが推定された。

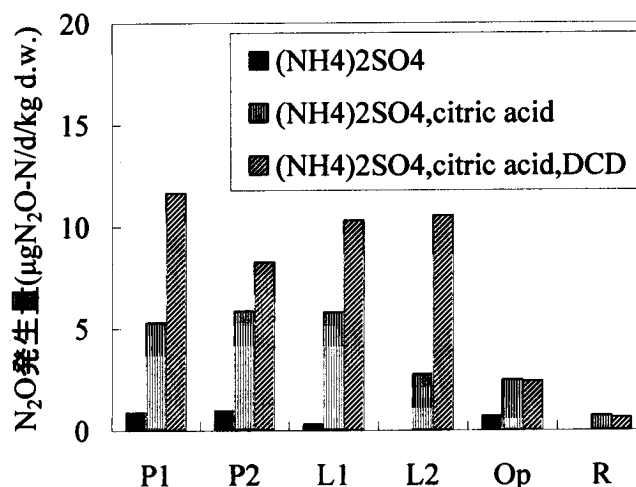


図-5 土壌への各種添加実験

以上の結果から、当該地域では脱窒による $N_2O$ 生成は大きくなく、主として硝化過程によって生成しており、従属栄養硝化細菌の果たす役割が大きいことが推測された。

②メタン酸化菌について

メタン酸化菌数は $2 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^5$ 個であった。同一時期に採取した非攪乱試料で測定したメタン酸化菌との相関は低く（図-6、 $R=0.20$ ）、両者の関係は明瞭ではない。但し、P1、P2、Rでは最大活性を示す層位において最も多くメタン酸化菌数が計数されていること、L1およびOpの最表層はそれぞれ1998年および1996年の燃焼の影響を受けて安定した状態ではないことを考えると、メタン酸化菌数とメタン酸化活性の間には因果関係があることは否定できない。

(4)  $CO_2$ 生成に関する物質量の把握

土壤中の糖量は0-5cmで最も多く、 $9.44 \sim 19.43 \text{ mg g}^{-1}$ であった（表-5）。その中でもヘミセルロース画分のヘキソースの占める割合が高かった（平均で48.7%）。土壤円筒試料の $CO_2$ 生成ポテンシャルとこれらの土壤糖の関係を解析すると、熱水抽出画分との相関係数が高かった（図-7）。土壤中の $CO_2$ 発生量はこれらの基質の量によって決定されているか、あるいはこれらの基質を生成する過程によって決定されているかどちらかの可能性が高い。

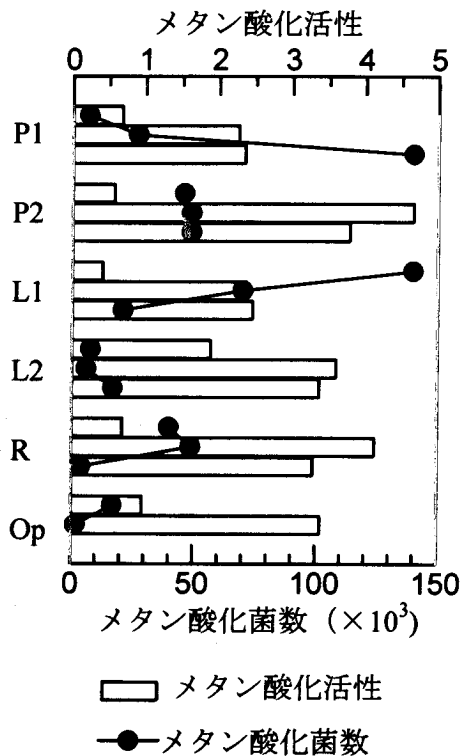


図-6 土壤深さ別メタン酸化菌数とメタン酸化活性（図中、各地点の土壤深さは上から0~5cm、5~10cm、10~15cm）

表-5 パシルマヤン土壤中の糖量

		Total Hemicellulose			Cellulose			percentage	
		Total (mg/g)	Hexose (mg/g)	Pentose (mg/g)	Total (mg/g)	Hexose (mg/g)	Pentose (mg/g)	to the total C (%)	
P1	0-5	9.44	7.07	5.95	1.12	2.36	2.07	0.29	17.8
	5-10	7.03	5.54	4.67	0.87	1.49	1.23	0.26	17.0
	10-15	7.68	6.59	5.77	0.82	1.08	0.90	0.19	22.1
P2	0-5	8.79	6.52	4.68	1.84	2.27	1.77	0.50	16.4
	5-10	3.96	3.04	2.24	0.80	0.92	0.72	0.21	15.5
	10-15	4.83	3.94	3.03	0.91	0.89	0.66	0.23	20.8
L1	0-5	10.39	7.00	4.92	2.08	3.39	2.59	0.80	18.5
	5-10	7.09	5.17	3.86	1.31	1.92	1.46	0.46	22.0
	10-15	5.39	4.11	2.96	1.15	1.28	0.96	0.32	20.0
L2	0-5	11.77	8.65	7.21	1.45	3.11	2.65	0.47	20.5
	5-10	4.53	3.69	2.90	0.78	0.84	0.67	0.17	15.2
	10-15	3.67	2.98	2.36	0.62	0.68	0.52	0.16	17.2
R	0-5	19.43	14.56	11.80	2.76	4.87	4.21	0.66	23.2
	5-10	8.43	6.46	4.48	1.99	1.96	1.44	0.52	18.5
	10-15	6.30	4.92	3.56	1.37	1.38	1.06	0.32	16.8
Op	0-5	10.48	7.28	5.08	2.20	3.20	2.36	0.83	21.5
	5-10	8.70	5.53	3.84	1.70	3.17	2.53	0.63	18.2

\*data with the sample on Oct. 1999

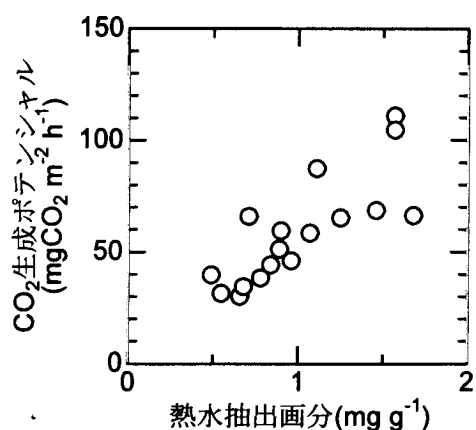


図-7 0~5cm、5~10cm、10~15cmの土壤中の熱水抽出画分糖量とCO<sub>2</sub>生成ポテンシャルの関係

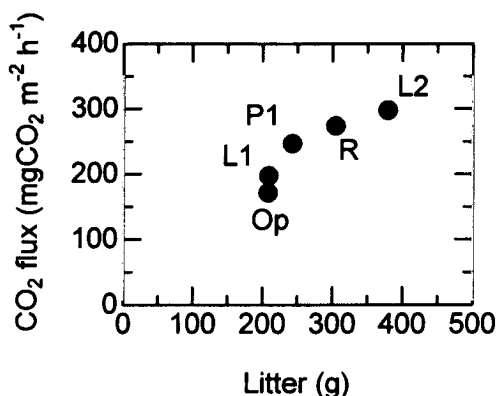


図-8 各試験地のリター量(2000年9月)と、CO<sub>2</sub>フラックス平均値(1997年1月~1998年8月)の関係

2000年9月におこなったリター量調査の結果、CO<sub>2</sub>フラックスとの相関係数は $R=0.87$ と高く、CO<sub>2</sub>発生量に大きな影響を与えていることが示唆された(図-8)。なお、Opのリター量がこの当時よりも増加しているため、当時のリター量のデータであればさらに相関係数が高くなると考えられる。リター量は森林のバイオマス量に大きく影響を受けるため、森林のバイオマス量によるCO<sub>2</sub>フラックス推定法の可能性が示唆される。

#### (5) 広域調査

調査地点の詳細は本報告書のB-5(1)を参照されたい。調査地は大きく西部の山岳地帯と東部~中央部の低地にわけられ、山岳地帯の土壌はAndisolsに属すると考えられる火山灰土壌(クリンチ山由来の火山灰)、低地の土壌は第四系堆積岩を母材とする強酸性のOxisolsあるいはUltisolsである。低地はさらにジャンビ市とそれ以西で異なり、ジャンビ市の2地点はAlluvialと記述されているため、湿性(udic)のOxisols(Udox)、それ以西は湿潤(ustic)なOxisols(Ustox)と考えられる。ゴム林については植栽されてから10年以下と考えられるものを若齢ゴム林(yR)、10年以上経過していると考えられるものを壮齢ゴム林(oR)としてさらに細分化して統計処理をおこなった。

##### ①土壌の性質について

表-5に土壌の分析結果を示す。Andisols土壌のpHは平均値で6.2と他の土壌の平均値4.5に比べて1%水準で有意に高かった。その他、Andisols土壌とその他の土壌で硝化速度(それぞれ1.18および0.60  $\mu\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$ )、微生物バイオマス炭素量(それぞれ1630および740  $\mu\text{gC g}^{-1}$ )、微生物バイオマス窒素量(それぞれ280および100  $\mu\text{gN g}^{-1}$ )、含水比(それぞれ0.93および0.38  $\text{kg kg}^{-1}$ )、仮比重(それぞれ0.63および0.94  $\text{Mg m}^{-3}$ )、液相率(それぞれ51および34%)において1%水準で有意な差が認められた(カッコ内はそれぞれの平均値)。

広域調査の地点のうちパシルマヤン試験地と明らかに異なる性質を示すAndisols土壌を除いた20地点とパシルマヤン試験地との土壌について、各パラメータのt検定による差の検定をおこなっ



表-6 広域調査の土壌分析結果

plot	土地 <sup>a</sup>	pH	NH <sub>4</sub> (μg g <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> (μg g <sup>-1</sup> )	窒素無機化 (μg g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	硝化 (μg g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	Bio C <sup>b</sup> (μgC g <sup>-1</sup> )	Bio N <sup>c</sup> (μgN g <sup>-1</sup> )	含水比 (%)	仮比重 (Mg m <sup>-3</sup> )	固相率 (%)	気相率 (%)	液相率 (%)	リター量 (g)
A1	L	4.32	1.94	3.07	0.50	0.58	651	103	0.35	1.01	38.9	25.8	35.4	104.6
A2	O	5.04	4.41	1.06	0.16	0.33	198	32	0.34	1.16	44.5	16.3	39.2	43.5
A3	L	4.10	7.78	7.76	1.33	1.12	1305	148	0.54	0.69	26.5	36.3	37.2	125.7
A4	oR	4.47	7.93	4.88	1.51	1.63	1397	166	0.52	0.68	26.1	38.8	35.2	74.0
A5	A	5.12	13.80	5.77	0.11	0.02	480	30	0.22	0.91	34.8	45.0	20.1	4.8
A6	L	4.81	5.45	2.14	0.68	0.63	970	169	0.11	1.11	42.8	44.7	12.5	94.4
A7	A	4.77	9.77	2.37	0.29	0.41	640	81	0.58	0.77	29.6	25.9	44.5	35.0
A8	O	4.70	4.63	1.54	0.19	0.28	518	74	0.29	1.08	41.7	27.2	31.2	51.3
A9	L	4.20	5.24	5.11	1.03	1.10	1101	172	0.43	0.93	35.8	24.5	39.6	48.3
A10	oR	4.43	8.38	0.95	0.39	0.50	795	148	0.84	0.75	28.9	7.7	63.4	34.9
A11	L	6.06	14.61	4.31	2.36	2.65	3426	553	1.85	0.29	11.3	34.1	54.6	40.4
A12	C	6.49	12.02	4.77	1.73	1.97	1521	265	1.11	0.47	18.1	29.6	52.3	14.1
A13	C	5.66	10.36	2.74	1.20	1.37	1540	283	0.98	0.53	20.3	28.2	51.5	56.0
B1	oR	4.16	4.73	4.31	0.50	0.64	616	89	0.34	0.98	37.6	28.7	33.7	55.9
B2	oR	4.16	5.50	2.61	0.69	0.66	735	107	0.31	0.95	36.4	34.3	29.3	158.0
B3	A	4.91	2.00	1.51	0.08	0.21	376	49	0.14	1.05	40.5	45.0	14.6	34.1
B4	O	4.63	2.34	0.89	0.26	0.33	309	42	0.16	1.18	45.5	35.8	18.7	33.9
B5	yR	4.45	3.02	0.50	0.17	0.23	286	41	0.21	1.20	46.0	29.0	25.0	70.2
B6	A	4.54	3.22	0.98	0.24	0.37	892	122	0.44	0.87	33.4	28.3	38.3	26.3
B7	O	4.29	2.85	1.15	0.46	0.66	709	101	0.46	0.93	35.9	21.0	43.1	53.8
B8	L	4.30	3.98	8.07	0.90	0.67	1039	124	0.34	0.76	29.4	44.4	26.2	24.8
B9	oR	4.27	8.41	1.97	0.99	1.10	861	133	0.44	0.84	32.4	30.6	37.1	18.7
B10	O	4.67	3.02	3.30	0.49	0.60	824	119	0.60	0.89	34.3	12.3	53.4	12.6
B11	L	6.85	5.37	1.16	0.67	0.76	1380	271	0.52	0.88	33.7	20.6	45.7	20.1
B12	yR	6.15	6.05	1.26	0.72	0.84	1568	270	0.82	0.67	25.8	19.3	54.9	20.4
B13	A	5.97	3.18	0.46	-0.07	-0.01	1047	151	0.51	0.84	32.2	24.7	43.1	33.9
B14	C	6.10	6.01	1.18	0.54	0.71	961	170	0.72	0.76	29.3	15.9	54.8	35.3

<sup>a</sup> 土地利用形態で略号はそれぞれ以下の通り。L; 森林、A; アランアラン草原、C; シナモン林、O; オイルパーム林、yR; 若いゴム林、oR; 古いゴム林

<sup>b</sup> Biomass C, <sup>c</sup> biomass N

たところ、5%有意水準でパシルマヤン土壌はアンモニア態窒素が多く、硝化速度が小さく、微生物バイオマス窒素量が小さく、リター量が多く、土壌の含水比が小さく、液相率が低く、気相率が高かった。これらの結果は、パシルマヤン試験地の土壌が周囲の地域の土壌よりも乾燥しており、そのため種々の微生物活性が抑制されてリターの分解の遅れや硝化活性の低下を引き起こしていることを示している。

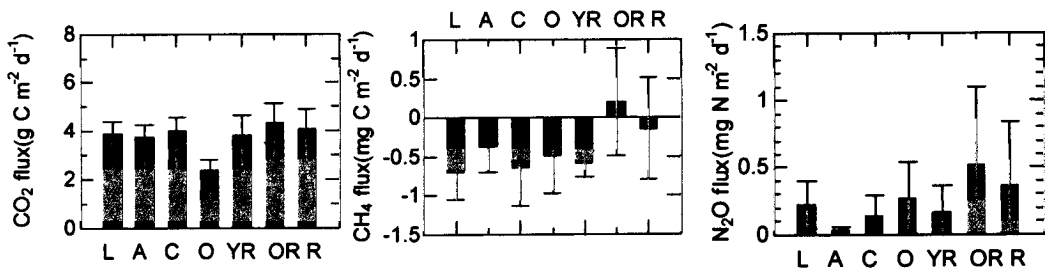


図-9 各土地利用ごとのフラックスの平均値

左: CO<sub>2</sub>、中央: CH<sub>4</sub>、右: N<sub>2</sub>O

L, 森林; A, アランアラン草原; C, シナモン林; O, オイルパーム林; YR, 若齢ゴム林; OR, 壮齢ゴム林; R, ゴム林全体

## ②CO<sub>2</sub>フラックスについて (図-9左)

27地点のフラックスの平均値は  $3.65 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であった。年平均気温 (約  $25^\circ\text{C}$ ) と降雨量 (2000~2500mm) から CO<sub>2</sub> 生成量を推定する Raich & Schlesinger<sup>4)</sup> の推定式で計算される本地域の推定値は  $3.17\sim 3.60 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であり、過去の観測結果とほぼ同じ範囲の値を示していると考えられた。オイルパーム林では、他の地点よりも有意に低かった。オイルパーム林の林床は他の林分やアランアラン草原と比較して下層植生が少なく、これらの根呼吸が CO<sub>2</sub> フラックスに貢献しないために小さい値を示したものと考えられる。パシルマヤンの CO<sub>2</sub> フラックスと比較すると、27地点における CO<sub>2</sub> フラックスは有意に大きかった (有意水準 0.1%以下)。パシルマヤン試験地は乾燥による土壌有機物の分解の遅れによって CO<sub>2</sub> フラックスが小さくなったものと考えられる。

27地点のフラックス値と土壌のパラメータの間に有意な相関を示すものはなく、リター量とも相関は認められなかった。

## ③CH<sub>4</sub>吸収フラックスについて (図-9中央)

27地点の吸収フラックスの平均値は  $0.45 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であった。森林におけるメタン吸収フラックスは  $0.84\pm 0.38 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であり、他の土地利用における観測値よりやや大きかった。また、この値は他の熱帯林の観測例 ( $0.79\pm 0.12 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Potter et al.<sup>5)</sup>) とほぼ同等であった。Andisol 土壌とその他の土壌の間に有意な差は認められなかった。パシルマヤン試験地と7ヶ所の森林における結果の平均値と標準偏差はそれぞれ  $0.64$ 、 $0.47 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であった。

パシルマヤン試験地の森林土壌のメタン吸収フラックスと27地点中7地点の森林における観測結果の差を検定したところ、5%水準で有意な差が認められた (有意確率 2.9%)。すなわち、パシルマヤンの観測結果は何らかの理由で7地点の観測結果よりメタン吸収フラックスの値が小さいと考えられる。差の検定で確認された中で、パシルマヤン試験地の土壌の気相率が大きいことは、一般にメタン吸収フラックスを大きくする要因と考えられるが、それに反してメタン吸収フラックスが小さい。強い乾燥がメタン吸収フラックスを減少させるという報告例 (Whalen and Reeburgh<sup>6)</sup>) があること、CO<sub>2</sub> フラックスもパシルマヤン試験地は他の試験地より小さいことなどから考えると、パシルマヤン試験地では乾燥によるメタン酸化活性の阻害がおこっているためにメタン吸収フラックスが小さいと考えられる。Potter ら<sup>5)</sup> の観測値と広域調査の結果がほぼ同じ程度のフラックス値を示していたこと、当該試験地の粒径組成は Dörr ら<sup>7)</sup> の粒径分類では medium から coarse に属すると考えられ、これらの土壌のメタン吸収フラックスとして予測された Dörr ら<sup>7)</sup> の推定値  $0.33\sim 1.07 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  にほぼ収まったことなどから、熱帯域におけるメタン吸収量推定は既存の文献の結果が支持される。

また、パシルマヤン試験地で認められた気相率とメタン吸収フラックスの正の相関関係は認められなかった。メタンフラックスは先ほども述べたように、シロアリの影響を大きく受ける。したがって、シロアリの寄与率を個々の試験地に適用しないと他のパラメータとの相関関係が明らかにならない。今後は、安定同位体比の測定などによって、シロアリの寄与率を算出して解析をしていく必要がある。

## ④N<sub>2</sub>Oフラックスについて (図-9右)

27地点のフラックスの平均値は  $0.16 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であった。パシルマヤン試験地の6ヶ所を合

む 33ヶ所の  $N_2O$  のフラックスの頻度分布は他の2つのガスと異なり、L字型の分布を示した(図-10)。このことは、 $N_2O$  フラックスは基本的に小さいが、場所によってフラックスが大きくなるホットスポットが存在することを示唆している。フラックス値は他の熱帯土壌で観測された値よりも小さかった。

$N_2O$  フラックスはパシルマヤン試験地でも観測されたように、硝化速度と正の相関を示した(図-11)。その傾きは Andisols 土壌において小さかった。このことから、当該地域における  $N_2O$  生成量が他の熱帯地域より小さいのは、硝化速度が小さいことが原因であると考えられた。なぜ硝化速度が小さいかについて説明できる明確なデータは存在しないが、pH の低い貧栄養な土壌であることが一因かもしれない。日本の土壌には Andisols 土壌が広く分布するため、Andisols 土壌ではなぜ硝化速度が大きいのに  $N_2O$  生成速度が大きくなるかに関しては今後の研究によって明らかにしなければならない重要課題である。

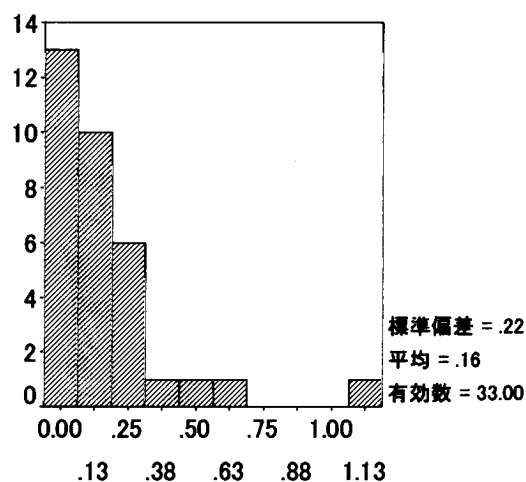


図-10  $N_2O$ フラックス ( $mgN m^{-2} d^{-1}$ ) の頻度分布 (X軸はフラックス、Y軸は頻度を表す)

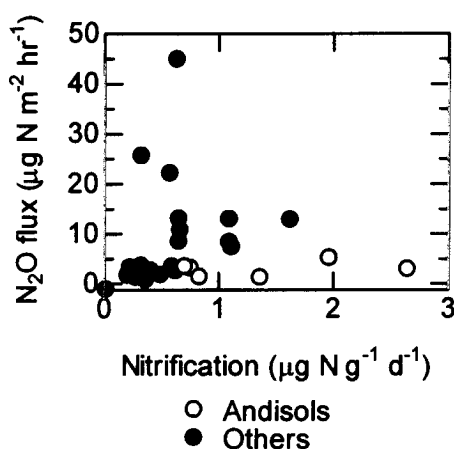


図-11 27地点における硝化速度と  $N_2O$ フラックスの関係

## 5. 本研究より得られた成果

パシルマヤン試験地の分析結果から、硝化過程が  $N_2O$  生成の主過程であるという推論が支持され、硝化速度と  $N_2O$  フラックスの間に全球的に通用する関係が見いだされた。アンモニア酸化菌および亜硝酸酸化菌は伐採跡地で検出され、この地点における  $N_2O$  フラックスが硝化過程で発生しているという仮定と合致した。これらの硝化が従属栄養細菌によると推定された。これは今までに知られていなかった新しい知見である。脱窒菌の生息数は多くなく、脱窒による  $N_2O$  生成はそれほど重要ではないと考えられた。また硝化速度に対する  $N_2O$  生成速度は Andisols 土壌で低いことが明らかになり、そのメカニズムの解明が急がれるとともに、Andisols 土壌には新しいエミッションファクターを適用する必要があることが明らかになった。  $CO_2$  フラックスと  $CH_4$  フラックスは乾燥・湿潤という熱帯特有のサイクルに大きく影響を受け、パシルマヤン試験地では乾燥による微生物活動の阻害が  $CO_2$  フラックスと  $CH_4$  吸収フラ

ックスを低下させていると考えられた。パシルマヤン試験地の $\text{CH}_4$ 吸収フラックスは土壌の気相率と正の相関があった。しかし、広域調査の結果ではこの傾向は認められず、その原因は特定できなかったが、シロアリの影響が大きいと考えられる。 $\text{CH}_4$ 酸化活性と $\text{CH}_4$ 酸化菌数の関係は明瞭ではなく、 $\text{CH}_4$ フラックスを決定する要因についてはさらに解析が必要だと考えられた。また、土壌糖量を測定した結果から、土壌中の熱水抽出画分が $\text{CO}_2$ 生成に重要な役割を果たしている可能性が示唆された。パシルマヤン試験地の $\text{CO}_2$ フラックスはリター量との相関が高く、 $\text{CO}_2$ フラックスを森林のバイオマス量から推定する手法に可能性を見いだした。しかし、この関係は広域調査の観測にはあてはまらず、今後さらなる研究が必要と考えられる。

## 6. 引用文献

- 1) Matson, P. A., and P. M. Vitousek, Cross-system comparisons of soil nitrogen transformations and nitrous oxide flux in tropical forest ecosystems, *Global Biogeochem. Cycles*, 1, 163-170, 1987.
- 2) Livingston, G. P., P. M. Vitousek, and P. A. Matson, Nitrous oxide flux and nitrogen transformations across a landscape gradient in Amazonia, *J. Geophys. Res.*, 93, 1593-1599, 1988.
- 3) Keller, M., Kaplan, F. W., Wofsy, S. C. and da Costa, J. M., Emissions of  $\text{N}_2\text{O}$  from tropical forest soils: response to fertilization with  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{PO}_4^{3-}$ , *J. Geophys. Res.* 93, 1600-1604, 1988.
- 4) Raich J. W., and Schlesinger, W. H., The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate, *Tellus B* 44, 81-99, 1992.
- 5) Potter, C. S., E. A. Davidson, and L. V. Verchot, Estimation of global biogeochemical controls and seasonality in soil methane consumption, *Chemosphere*, 32, 2219-2246, 1996.
- 6) Whalen, S. C., Reeburgh, W. S., Moisture and temperature sensitivity of  $\text{CH}_4$  oxidation in boreal soils, *Soil Biol. Biochem.* 28, 1271-1281, 1996.
- 7) Dörr, H., Katruff, L., Levin, I., Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soils. *Chemosphere* 26, 697-713, 1992.

### [国際共同研究の情勢]

インドネシア環境省、BIOTROP-GCTE-ICSEA、およびボゴール農科大学と共同研究を実施した。

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

① Ishizuka, S., H. Tsuruta and D. Murdiyarso (2000) Relationship between the fluxes of greenhouse gases and soil properties in a research site of Jambi, Sumatra, in "The impacts of land-use/cover change on greenhouse gas emissions in tropical Asia", eds. by D. Murdiyarso and H. Tsuruta, GCTE-ICSEA and NIAES, 17-24.

② Ishizuka S., Tsuruta H., Murdiyarso D. (in press)  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and soil properties at four land-use types in Sumatra, Indonesia., *Global Biogeochem. Cycles*.

#### (2) 口頭発表

① 石塚成宏・鶴田治雄・D.Murdiyarso (1999) スマトラ島ジャンビ州の異なる土地利用形態

における温暖化ガスのフラックスと土壌の諸性質との関係, 日本土壌肥料学会講演要旨集, 45, P.276

- ② 鶴田治雄, 石塚成宏, 上田真吾, D.Murdiyarso (1999) スマトラ島ジャンビ州の異なる土地利用形態の土壌からの温室効果ガスのフラックス測定, 日本土壌肥料学会講演要旨集, 45, P.275
- ③ Tsuruta H., Saito G., Okamoto K., Ishizuka S., Hayashi M., Ueda S., Inubushi K., Hadi A., Murdiyarso D., Lilik B. P., Wasrin U. B.(1999) The Influence of Land-Use/Cover Change on Greenhouse Gas Emission in Tropical Asia. Second IGBP Congress, Shonan Village, Japan.
- ④ 中島泰弘・石塚成宏・鶴田治雄・Daniel Murdiyarso (2000) 熱帯アジアでの土地利用変化に伴う土壌からの亜酸化窒素発生要因の解明(1)硝化および脱窒と亜酸化窒素フラックスとの関係、日本土壌微生物学会 2000 年度大会
- ⑤ 石塚成宏・中島泰弘・鶴田治雄・Iswandi A.・Murdiyarso D.(2001) 異なる土地利用における温室効果ガスの地表面からの発生速度とそのメカニズムについて —スマトラ島ジャンビの固定試験地での例—, 第 112 回日本林学会大会 学術講演集, 501
- ⑥ 中島泰弘・石塚成宏・鶴田治雄・Iswandi A.・Murdiyarso D.(2001)熱帯アジアでの土地利用変化に伴う土壌からの亜酸化窒素発生要因の解明(2)従属栄養性硝化細菌と亜酸化窒素フラックスとの関係, 日本土壌微生物研究会 2001 年度大会
- ⑦ Nakajima, Y., Ishizuka S., Tsuruta H., Iswandi A. and Murdiyarso D. (2001) Main microbial processes for nitrous oxide emissions from soils in different land- use patterns in Sumatra, Indonesia. 9th International Symposium on Microbial Ecology, 2001, p333-334
- ⑧ Iswandi, A., Gultom T., Ishizuka S.,Djajakirana G., Nakajima, Y., Yonemura, S., Tsuruta H. (2002) Seasonal variation of soil properties at different land use types in Jambi province, Indonesia, An International Workshop on Land-Use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba 19-21 Feb. 2002.
- ⑨ Ishizuka S., Iswandi, A., Nakajima Y., Yonemura S., Tsuruta H., and Murdiyarso D.(2002) The variation of greenhouse gas emissions from soils and the control of gas emissions at various land-use/cover types in Jambi province., An International Workshop on Land-Use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba 19-21 Feb. 2002.
- ⑩ Ishizuka S., Nakajima Y., Iswandi A., Tsuruta H., Murdiyarso D.(2002、8 月予定) Greenhouse gas emissions and their control at four land-use types on Sumatra Island, Indonesia, Proceedings of XVith International Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし