

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

(1) 土地利用変化に伴う温室効果ガスの発生・吸収の現地調査とその総合評価

① 湿潤熱帯林地域における温室効果ガス発生吸収の現地調査とその総合評価

独立行政法人 農業環境技術研究所

地球環境部	温室効果ガスチーム	鶴田治雄・須藤重人
地球環境部	気象研究グループ	米村正一郎・川島茂人
化学環境部	栄養塩類研究グループ	中島泰弘

(研究協力機関・研究者)

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
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 28,019 千円
(平成 13 年度予算額 11,232 千円)

[要旨] インドネシアの代表的な陸域生態系である湿潤熱帯林およびこれらの土地利用変化による農耕地のゴムや油ヤシのプランテーション地域で、温室効果ガス(メタン(CH₄)、二酸化炭素(CO₂)、亜酸化窒素(N₂O))の発生・吸収量の時間変化と空間変化を解明するため、現地調査を行った。(1)スマトラ島ジャンビ州のパシルマヤン試験地で4つの異なる土地利用形態の6地点(一次林(2地点)、択伐林(2地点)、伐採焼却後植林地、初期ゴム園)で、1997年9月から2002年3月まで温室効果ガスフラックスを毎月測定した。その結果、択伐林が伐採・焼却され植林されていく過程で、N₂Oフラックスは焼却後急激に増加したがその後ゆっくりと減少し約2年半後には伐採前のレベルに戻り、一方、CH₄吸収フラックスは焼却後ほとんど0に近く小さくなったが、その後次第に大きくなり2年半後には伐採前のレベルに戻ったことが、はじめて明らかになった。この回復速度は、中米で熱帯林が牧草地に変化するとN₂Oの発生が約10年間増加した結果と大きく異なった。(2)また、一次林や択伐林からのN₂Oフラックスは、CO₂と同様に雨期に大きく乾期に小さくなる季節変化を示したが、年平均値は10μgNm⁻²h⁻¹以下で中南米熱帯地域よりも非常に小さく、IPCCによる熱帯林土壌からの発生量は過大に推定されていたことがわかった。(3)なお一次林土壌からはしばしばCH₄が土壌から大気中に放出されたので、2001年9月に約0.5haの森林内の80地点でフラックスの集中測定を行った。その結果、約半数の地点でCH₄の土壌から大気中への放出がみられた。この原因はおもにシロアリの存在によるものと推定され、安定同位体比の測定により発生源を同定する予定である。(4)ジャンビ州内で6種類の土地利用形態(一次林、択伐林、油ヤシ園、ゴム園、シナモン園、草地)の27地点で広域フラックス調査を2001年9月に実施した結果、N₂Oフラックスは耕作放棄されたアランアランの草地で最小であり、ゴム園では生育年数とともに大きくなる傾向があったが、油ヤシ園では施肥の影響を除けば、生育年数に関係なく小さかった。また、火山灰土壌ではN₂Oフラックスが他の土壌タイプ

より小さく、土壌タイプも N_2O の発生に大きく影響を与えていることが明らかになった。(5) 一方、 CH_4 の吸収フラックスは、一次林および択伐林、油ヤシ園・ゴム園・シナモン園、草地の順に大きかった。なお、 CH_4 が土壌から大気中に放出された地点があり、これはシロアリの影響と推測された。さらに CO_2 フラックスは、油ヤシ園で最小であり、生育年数に関係なく下草が少なく土壌が固いためと推定された。(6) 以上の結果から、熱帯アジアのインドネシアの陸域生態系土壌からの温室効果ガスの発生量は他の熱帯地域と異なっており、その発生・吸収要因は土地利用形態および土壌タイプによることが、はじめて明らかになった。

[キーワード] スマトラ島、湿潤熱帯林、土地利用変化、温室効果ガス、発生・吸収量

1. はじめに

アジア太平洋地域では人口の急増に伴い、土地利用形態が大きく変化しつつある。特に熱帯地域では、熱帯林が消失して農耕地などに急速に変化しつつある。このような土地利用／土地被覆の変化によって温室効果ガスの発生量や吸収量が変化し、地球温暖化に影響を及ぼしていると推測されている。しかし、熱帯アジア地域では、これらの研究はこれまで実施されていなかったもので、その実態はまったくわからなかった。そこで、インドネシアの研究者と共同でインドネシアにおいて現地調査研究を 1997 年から開始した。なお、インドネシアでは、広大な面積を持つ湿潤熱帯林と泥炭湿地を調査研究の対象とした。IPCC によれば、湿潤熱帯林の土壌は N_2O の主要な発生源の一つとされているが、熱帯アジアでの湿潤熱帯林での測定がなかったため、その推定値の不確実性は大きい。また、世界のメタン発生量の約 20% は自然湿地から発生していると推定されているが、熱帯アジアの泥炭湿地からの温室効果ガスの発生・吸収に関する調査研究は、これまで行われていなかった。さらに、この泥炭湿地も一部では急速に農耕地へ移行しつつある。なお、サブ課題 (1) では湿潤熱帯林と泥炭湿地とを研究対象としたが、本報告書では便宜的に内容を二つに分け、①湿潤熱帯林、②泥炭湿地として、それぞれ独立して報告する。また、湿潤熱帯林の研究では、本サブ課題 (1) ではおもに温室効果ガスの発生・吸収に関する現地調査の結果を報告し、その発生・吸収要因の解明については、サブ課題 (3) で報告する。

2. 研究目的

本研究の目的は、これまで測定例のなかった熱帯アジアの湿潤熱帯林及びその周辺の開発地域において、1997 年あるいは 1998 年から開始した温室効果ガスのフラックス測定を継続して実施するとともに、それらの地域が伐採や焼き畑によって消失し、農耕地やプランテーションへ移行するという土地利用変化に伴い、土壌からの温室効果ガスの発生・吸収量の空間変化と長期的な時間変化を明らかにすることである。

3. 研究方法

スマトラ島中部のジャンビ州付近 (図 1 左) で、湿潤熱帯林およびその周辺の異なる土地利用形態における土壌からの温室効果ガスフラックスの長期変化と空間変化を把握するために、次に示す 3 種類の調査を実施した。

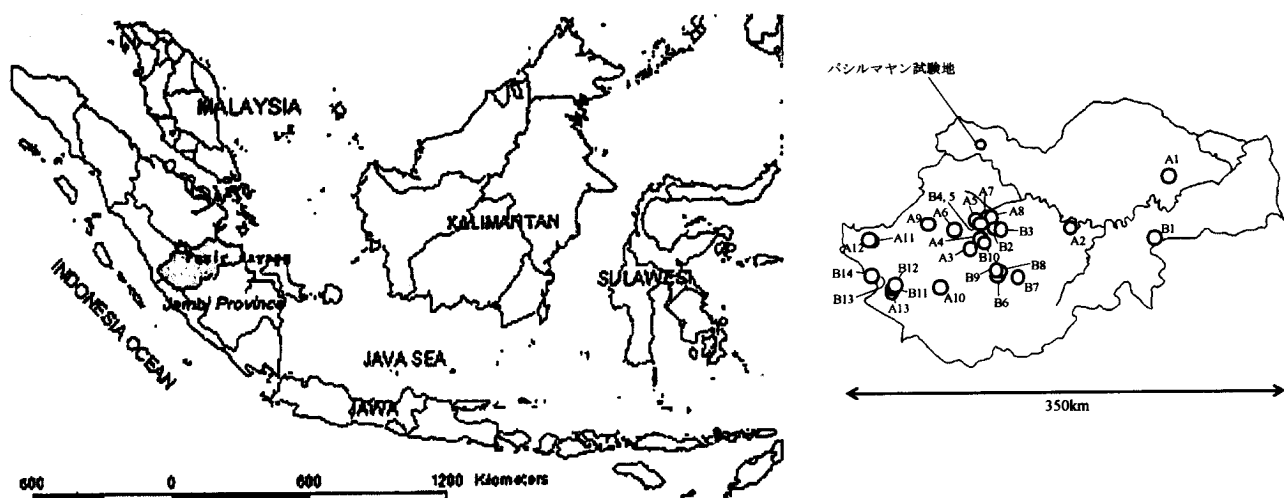


図1 左図はインドネシアのスマトラ島ジャンビ州（灰色の地域）と北部のパシルマヤン試験地の位置。右図はジャンビ州での広域調査における27測定地点の概略の位置（表2参照）。

(1) パシルマヤン試験地での温室効果ガスフラックスの長期変化に関する調査

① 調査地点と調査期間……ジャンビ州北部のパシルマヤンにある BIOTROP 森林保護試験地及びその周辺の開発地域を現地調査地域に選定し、一次林(2 地点：P1、P2)、択伐林（過去に伐採された履歴を持つ森林地域：L2、L1）、皆伐・焼却直後の植林地(O)、初期ゴム園(R)など、4 種類の異なる土地利用形態を持つ6 地点で、土壌表面から大気への温室効果ガス(CH₄、CO₂、N₂O)のフラックス測定を、1997年9月から毎月1回、クローズドチャンバー法で実施した（各地点とも3連）。なお、予備調査を1997年1月と3月に実施し、3地点で土壌を採取しその物理化学性を分析した。その後、1997年9月から本格的な長期連続調査を6地点で開始した。各地点の特徴を表1に示す。なおこの測定は2002年3月まで継続したが、1998年の1、4、5月と2000年10月から2001年1月までの4ヶ月間は測定できなかった。また、地温と土壌水分量も同時に測定した。

② 調査地域の特徴……パシルマヤンは、平均年間降水量は2000～2500mmであり、通常、雨期は9月から3月まで、乾期は4月から8月までである。調査地域の6地点は半径10km以内に位置しており（南緯1°03'～06'、東経102°05'～10'）、土壌タイプは同一(podosolic)で土壌pHは表層(0～5cm)で4.0～4.8と強い酸性であり、肥沃ではなかった。なお土壌の諸性質については、本報告書のサブ課題(3)で詳細に説明されている。

③ 調査地点の概要……一次林(P1,P2)と択伐林のL2地点は、BIOTROP森林保護地域内に、その他の3地点は開発地域に設定した(表1)。O地点とL1地点は、道路を挟んで反対側に位置するように試験地を設定した。択伐林であったO地点は1996年の乾期に皆伐・焼却後に植林が開始されたが、その時点ではまだ択伐林であったL1では1年遅れて1997年の後半に伐採が開始され、1998年の3月に伐採終了とともに、焼却され植林された。本長期調査ではこのような土地利用変化に伴う土壌からの温室効果ガスフラックスの時間変化を把握できた貴重な地点となった。Rのゴム園は、企業が経営する規模の大きいゴム園と異なり、個人が所有する小規模なものであり、下草はアランアラン(Alang-alang)が生えていた。このような小規模ゴム園は、ジャンビ州ではゴム園全体の約70%を占めており、典型的な例と判断された。

表1 スマトラ島ジャンビ州北部のパシルマヤン試験地における調査地点の概要

試験地略称 (地点名)	P1 (P)	P2 (P)	L2 (P)	L1 (P)	O (P)	R (P)	Y (K)	L3 (K)
土地利用	一次林	一次林	択伐林	択伐林→伐採・焼却 その後植林	植栽直後	ゴム園	油ヤシ園	択伐林
履歴	研究用 保護林	研究用 保護林		'97/8-'98/2に伐採 '98/3に焼却	'96に皆伐・焼却 後、植林	'95/7に伐採 焼却後植林		
斜面・地形	緩斜面 斜面中部	平坦面 鈍重尾根	平坦面 平地	緩斜面 斜面上部	平坦面 鈍重尾根	平坦面 平地	平坦面 平地	平坦面 平地
設置日時	'97/1	'97/9	'97/9	'97/1	'97/1	'97/9	'98/9	'98/9
その他	数十年間 伐採記録 なし	数十年間 伐採記録 なし		焼却後 <i>Paraserianthes</i> 植栽 その後ゴムを再植	焼却後 <i>Gmelina</i> <i>arborea</i> 植栽 その後ゴムを再植	林床は	'91に植栽 臨時調査	臨時調査

注1：試験地 P1 と P2 の植生は *Shorea macrophylla*, *Dipterocarpus crinitus* 等。

注2：試験地 L2 の植生は *Shorea macrophylla*, *Scaphium macropodum* 等。

注3：試験地 O は、伐採・焼却以前はブッシュであり、95年7月に焼却後ゴムが植栽されたが枯死し、96/97年にゴムが再植された。

注4：試験地の Y と L3 は、1998年9-10月の調査時のみ臨時に設定された。

注5：地点名の(P)はパシルマヤン、(K)はクアマンクニンである。

注6：試験地 P1、L1、O は、1997年1月と3月に予備調査を実施し、土壌も採取分析した。

なお地点 Y と L3 は、パシルマヤンと異なる地域での温室効果ガスフラックスを比較するために2001年9月に実施した広域調査の予備調査として、1998年9~10月の現地調査時に、臨時に調査を行った地点である。この2地点は、パシルマヤンから50-70km南東に位置するクアマンクニンにあり、択伐林と7年を経過した油ヤシ園であった。

また、パシルマヤン試験地の事務所で測定している降水量のデータを収集した。

(2) パシルマヤン森林保護地域での温室効果ガスフラックス空間分布調査

後述するように、長期調査地点の P1 と P2 で CH₄ フラックスがしばしば正の値を示したので、その空間的異質性を明らかにするために、2001年9月の広域調査時に、森林保護地域内の P1 と P2 を含む約0.5haの地域内で、8 x 10メッシュ（1メッシュは3m x 3m）の格子80地点において土壌からの温室効果ガスフラックスをチャンバー法で測定し、その空間分布を求めた。

(3) ジャンビ州における温室効果ガスフラックスの空間変化に関する広域調査

スマトラ島中部において、土壌からのガスフラックスの空間変化を明らかにするために、2001年9月中旬の約10日間、ジャンビ州付近で広域調査を実施した（図1右）。この調査では、パシルマヤンの南側で、ジャンビ州の東部低地から西部の山岳地帯にかけて東西250km x 南北130km内に27地点を選定し、各地点で、土壌からの温室効果ガスフラックス（各地点とも7連）、土壌中の温室効果ガス濃度、地温、土壌水分量を測定した。27地点の土地利用形態は、表2に

表2 ジャンビ州での広域調査地点の概要(2001年9月)

地点No.	地点名	土地利用形態	緯度(南緯)	経度(東経)	海拔高度	傾斜	土壌タイプ
A1	Jambi	択伐林(肥沃な黒色土壌)	01°05'05.6"	103°33'46.3"	(1013hPa)	6°	Udox (Alluvial)
A2	Between Jambi and Muarabungo	油ヤシ園(5年)	01°35'39.0"	102°50'09.0"	(1006hPa)	<1°	Podosolic (?)
A3	Balai Jaya	択伐林	01°47'07.9"	102°05'46.8"	?	35°	Oxisol (or Lato)
A4	Rendal village	ゴム園(≥15年, リター有)	01°42'15.0"	102°10'20.8"	93	0°	Oxisol
A5	Sungai Buluh	草地(焼却後3ヶ月)	01°30'52.8"	102°08'05.0"	98.7	5°	Podosolic (?)
A6	Rantau Duku	択伐林(+古いゴム+多植)	01°36'32.9"	101°59'05.5"	109	22-24°	Oxisol
A7	West of A8 (Babako)	草地	01°29'30.1"	102°13'39.0"	66.3	4°	Latosol
A8	Babako	油ヤシ園(15年, 土壌固い)	01°29'17.1"	102°15'01.7"	73.4	0°	Ultisol
A9	KM31 Teluk Bengkuang	択伐林	01°32'49.1"	101°47'01.2"	180	24°	Ultisol
A10	Sungai Manau	ゴム園(+自然植生, 10-15年)	02°10'38.9"	101°52'25.6"	267+15	35°	Podosolic
A11	Bukit Genan Tujuh	一次林	01°42'40"	101°22'13"	1541+3	17-31°	Andisols
A12	Teluk Berasap	シナモン園(20年, 下草)	01°41'56"	101°20'40"	1409+3	0°	Andisols
A13	Desa Lempur	シナモン園(肥料無し)	02°13'12"	101°30'42"	1061	8°	Andisols
B1	Jambi	ゴム園(≥10年) (降雨)	01°42'00.2"	103°27'44.5"	(1005hPa)	0°	Udox (Alluvial)
B2	Kuamang Kunin	ゴム園(≥20年) (下草多)	01°35'37.6"	102°16'39.1"	?	0°	Podosolic (?)
B3	Kuamang Kunin	草地(農地と森林の中)	01°36'18.6"	102°19'29.6"	?	0°	Podosolic (?)
B4	Sungai Buluh	油ヤシ園(3~5年, リター)	01°32'38.3"	102°09'53.3"	50.2	0°	Entisol
B5	Sungai Buluh	ゴム園(6~8年)	01°32'45.7"	102°10'04.0"	72	0°	Entisol
B6	Sungai Musawan, Bangko	草地(土壌固い)	02°04'00"	102°17'54"	103	0°	Podosolic
B7	Karang AnyarBangko	油ヤシ園(3年)	02°04'25"	102°26'39"	113	0°	Podosolic
B8	Sungai Ulak, Bangko	択伐林(リター有り)	02°01'01"	102°18'34"	104	10°	Latosol(Oxisol)
B9	Mentawak, Bangko	ゴム園(≥10年, ミミズ)	01°59'56"	102°17'16"	146	0°	Latosol
B10	Bukit Apit	油ヤシ園(15年)	01°43'57"	102°12'06"	103	2.5°	Inceptisol
B11	Juju Kluru	一次林	02°10'47.5"	101°31'09.6"	866	15.5°	Andisols
B12	Pulaupandan	ゴム園(20年≥)	02°08'30.3"	101°32'22.2"	820	0.5°	Andisols
B13	Sungai Ning	草地(土壌非常に固い)	02°03'52.8"	101°21'55.7"	1140	8°	Andisols
B14	Punca Limau Saring	シナモン園(+様々な植生)	02°03'20.4"	101°21'32.2"	1160	12°	Andisols

示すように、1次林(P)2地点、択伐林(L)5地点、ゴム園(R)7地点、油ヤシ園(O)5地点、シナモン園(C)3地点、草地(A:アランアラン)5地点であった。ゴム園の生育年数は、10年以下の比較的若い樹令から20年以上も経過した古いものまであり、油ヤシ園も3~15年と生育年数に巾があった。土壌タイプは、沖積土、火山灰土、ポドゾルなど数種類存在していた。A1とB1地点は、東部の沖積土壌であった。なお、A10~A13、B11~B14は、西部のバリサーン山脈の内部とその周辺であり、A10を除いた各地点は高度1000m以上の場所に存在し、土壌は周囲の火山の影響で火山灰土であった。なお、パシルマヤンの土壌の諸性質は、沖積土および火山灰土よりもその他の地点の土壌に類似していた(サブ課題(3)参照)。

4. 結果と考察

(1) パシルマヤンにおける降水量

図2に示すように、5年間の年間降水量は1735(1997年)~2798mm(2001年)であった。乾期でも月最大降水量は約200mmであった。エルニーニョの発生した1997年は、乾期が5月から10月まで長く降水量も少なく、年間降水量も1735mmと少なかった。ラニーニャの1998年は乾期が存在しなかった。

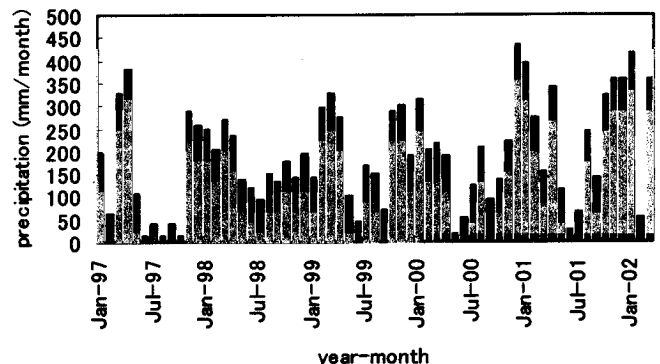


図2 パシルマヤン試験地での月間降水量の推移(1997年1月~2002年3月)

(2) パシルマヤンにおける温室効果ガスフラックスの長期変化

① 各地点における温室効果ガスフラックスの経月変化

ア 土地利用変化のなかった5地点

調査期間中に土地利用変化のなかった地点 P1、P2、L2、O、Rにおける温室効果ガスのフラックスの経月変化を、図3に示す。CO₂フラックスは他のガスよりもはっきりとした季節変化を示し、9月前の（あるいは9月を含む）数ヶ月の乾期の間小さくなり、その他の時期は大きくなった。N₂Oフラックスは、P1、O、Rではほとんど 10 μgNm⁻²h⁻¹以下と非常に小さく季節変化は明瞭ではなかった。しかし、P2とL2では、最大値 15-20 μgNm⁻²h⁻¹を示し、CO₂と同様な季節変化を示した。CH₄フラックスは、L2、O、Rでは調査期間中ほとんど常に吸収を示したが、P1ではしばしば、またP2ではほとんどの期間正の値を示し、最大値は 470 μgCH₄ m⁻²h⁻¹と非常に大きかった。これは、後述するように、おもにシロアリの影響と推測された。正の値の影響を除いたCH₄吸収フラックスは、L2で最大で、次にP1とRの地点で大きく、伐採焼却後のO地点では最小を示した。CH₄フラックスの季節変化は、L2とP1ではCO₂と同様に乾期に大きくなる傾向を示したが、その期間にメタンが正のフラックスを示すときもあり、さらに詳細な解析が必要である。これらからパシルマヤンでは通常、土壌水分量が少なくなる乾期にCO₂とN₂Oフラックスが小さくなり、逆にCH₄吸収フラックスは大きくなるという季節変化を示すこと、またCH₄についてはシロアリの活動の影響を大きく受けること、が示唆された。

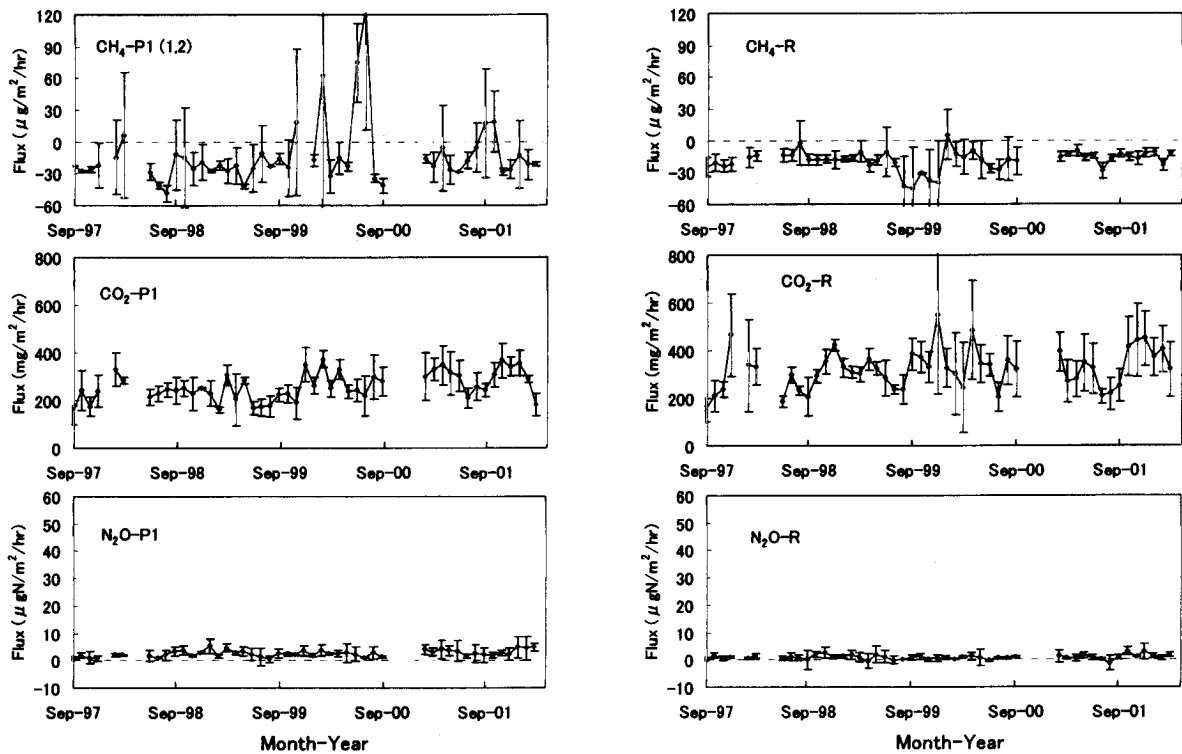


図3-1 パシルマヤンの一次林 P1 (左図) とゴム園R地点 (右図) における CH₄ (上段)、CO₂ (中段)、N₂O (下段) フラックスの長期変化 (1997年9月~2002年3月)。なおP1地点では、採取場所 No.3 でCH₄フラックスがしばしば正の値を示したので、図に示した平均値は他の2つの採取場所で測定されたデータだけを用いた。

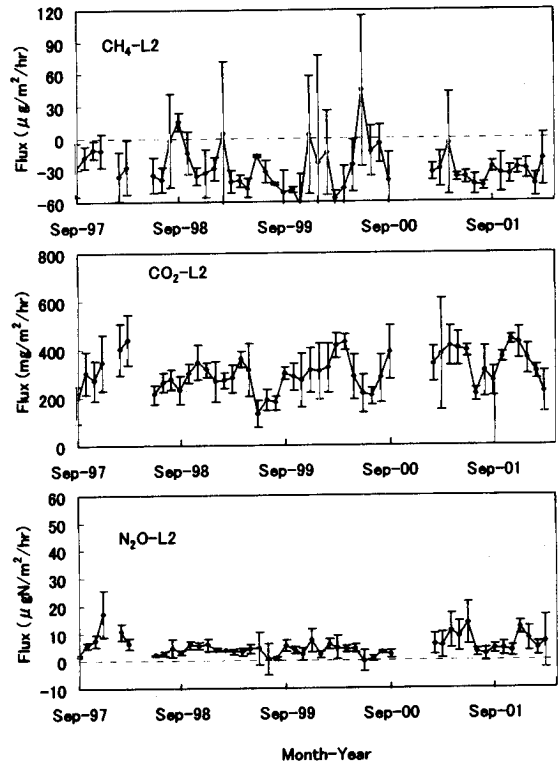
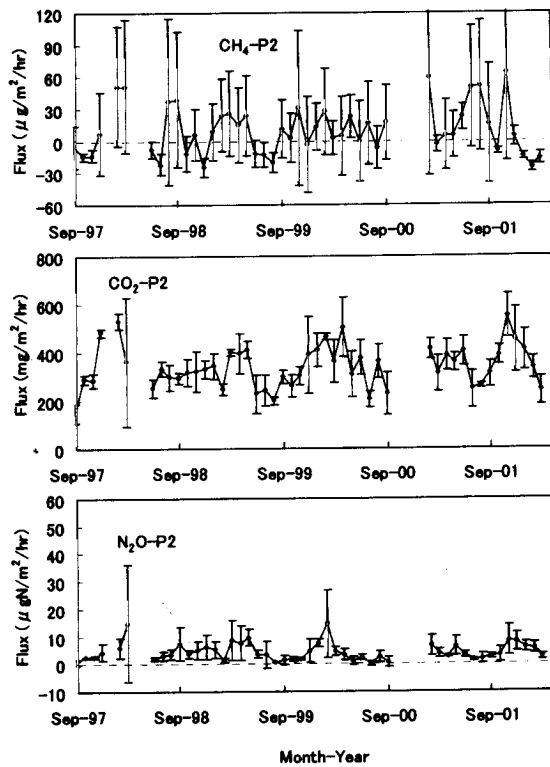


図3-2 パシルマヤンの一次林 P2 (左図) と択伐林 L2 地点 (右図) における CH₄ (上段)、CO₂ (中段)、N₂O (下段) フラックスの長期変化 (1997年9月~2002年3月)。

イ 伐採焼却された L1 地点

一方、調査期間中に土地利用に関して質的な変化がみられた地点 L1 での、温室効果ガスフラックス測定結果を図 4 に示す。L1 は、択伐林だったが調査期間中の 1997 年後半から伐採が開始され 1998 年 2 月に伐採が終了して焼却され、その後植林された。このような土地利用変化の過程で温室効果ガスのフラックスの変化が、本調査によりつぎのように初めて明らかにされた。N₂O フラックスは焼却後に急増したが、その後は減少し約 2 年半後には伐採前の択伐林時代のレベルまで戻った。一方、CH₄ の吸収フラックスは伐採期間中から焼却前後までほとんどなくなったが、その後次第に大きくなり、約 2 年半後には 1 次林 P1 のレベルに戻った。CO₂ フラックスは、焼却後一時的に 200mgCO₂m⁻²h⁻¹ に減少したが 8 ヶ月後には焼却前のレベルに戻り、2000 年 4 月以降は、平均 400mgCO₂m⁻²h⁻¹ 前後とさらに大きくなった。

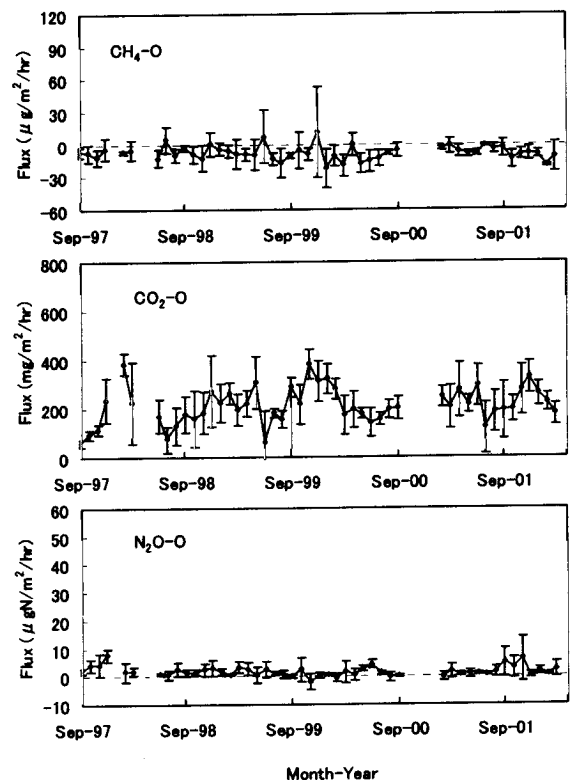


図3-3 パシルマヤンの植林地 O での推移

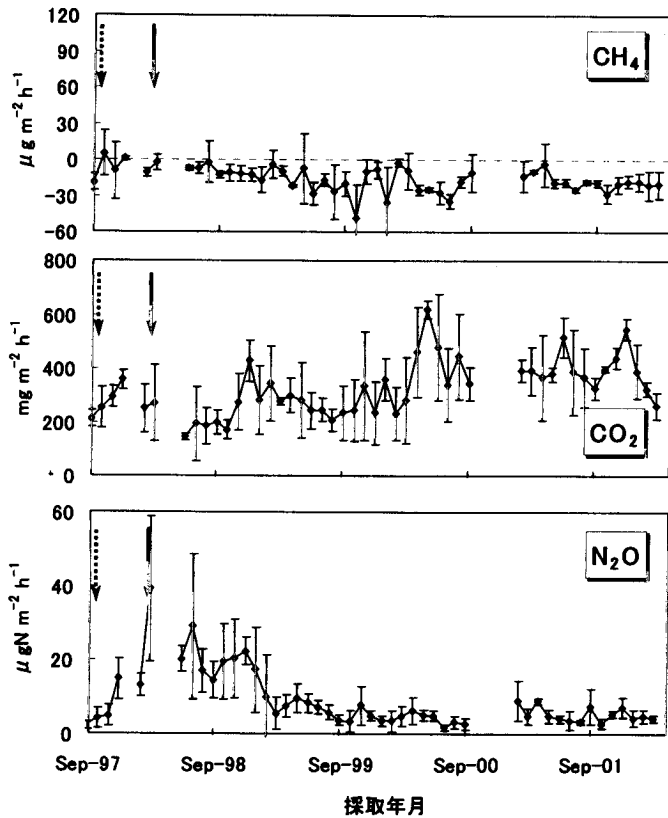


図4 L1地点でのCH₄、CO₂、N₂Oフラックスの経月変化。点線の矢印は伐採開始時期を、実線は焼却された時期を示す。

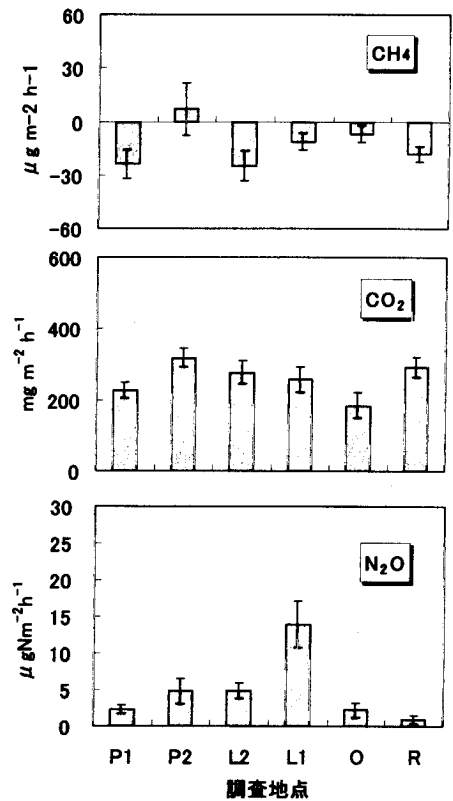


図5 6地点におけるCH₄、CO₂、N₂Oガスフラックスの2年間の平均値(1997年9月~1999年8月)

これらのCO₂フラックス増加の原因は、伐採・焼却および植林による土壌の質的变化や、リターの伐採・焼却による減少と植林による増加などが考えられる。なお、フラックスの季節変化は、前述した土地利用変化による大きな変動のために他の地点ほど明瞭ではないが、CO₂やN₂Oでは同様な季節変化がこの大きな変動の上に重なって表れていた。

② 土地利用形態別の温室効果ガスフラックス

図5は、6地点の空間変化をそれと等価な土地利用変化過程(P1/P2→L2→L1→O→R)に置き換えて、L1のフラックスに土地利用変化の影響が見られた2年間(1997年9月~1999年8月)のフラックス平均値を示したものである。N₂Oフラックスの土地利用変化による長期変化が、図4と図5で非常によく一致していることがわかった。中米で熱帯林から牧草地に変換すると約10年間N₂Oの発生が大きかったという報告があるが、本調査ではそれよりもずっと早く約2年半で伐採・焼却前の状態に戻ることが、はじめて明らかになった。また、O地点ではL1地点よりも1年前に伐採・焼却されたが、N₂OフラックスはP1、P2及びL2よりも小さく、伐採・焼却の影響をまだ受けていると推測された。RのN₂Oフラックスは6地点の中で最小であった。これは、ゴム園Rの林床がアランアランの草であったことやゴムの生育年数が短いことなどによると推測される(後述する広域調査で詳細に検討する)。CH₄吸収フラックスの平均値は、正の平均値を示したP2を除いた一次林P1と択伐林L2で最大で、R、L1、Oの順に小さくなった。CO₂

表3 パシルマヤン森林保護地区における温室効果ガスフラックスの多点測定

ガスの種類	平均値	最小～最大値	最多頻度クラス(f)	単位
N ₂ O	2.58±2.90	-2.18～11.0	1≤f< 2	μgN m ⁻² h ⁻¹
CO ₂	562 ±202	238 ~1096	400≤f< 499	mgCO ₂ m ⁻² h ⁻¹
CH ₄	46.1±120.9	-74.6 ~460	-50≤f< 0	μgCH ₄ m ⁻² h ⁻¹

フラックスの平均値は、P2 が最大で、同じ一次林の P1 よりも大きかった理由の一つはシロアリの影響と推測された。また、L1 よりも1年前に伐採・焼却された地点 O では最小であった。

(3) パシルマヤンでのフラックス多点集中測定
 パシルマヤンの P1 と P2 地点を含む 80 地点でのフラックス集中測定結果を表3と図6に示す。

① CH₄……全地点の平均フラックスは 46.1 μg CH₄ m⁻²h⁻¹ と正の値を示した。この原因は、図6の頻度分布に示すように、全地点の半数で、CH₄ が土壌から大気中へ放出されていたためである。広域調査では、正の CH₄ フラックスが測定された地点の数カ所でシロアリが観察されたので、シロアリが CH₄ の発生源であると推測される。したがって、フラックスが正の他の地点でもシロアリの可能性は大きい。なお、シロアリの影響であれば同時に CO₂ 濃度も高くなる可能性があるが、広域調査での土壌ガスの測定によれば、表層土壌中の CH₄ 濃度が高くても、CO₂ 濃度は高くない場合もあった。なお前述した広域調査では、CH₄ が正の地点は非常に少なかったため、これはパシルマヤンの森林保護地域特有のものと推測されるが、この地域になぜシロアリが多く存在しているか、あるいはそれと異なる CH₄ 生成機構があるのかは、現時点では不明である。

② N₂O……全地点のフラックス平均値は 2.58 μgN m⁻²h⁻¹、最大値は 11 μgN m⁻²h⁻¹ であった。これらの値は、パシルマヤンでの P1 と P2 地点での3年間の平均値とほぼ等しかった。しかし、後述する広域調査の平均値よりは小さかった。

③ CO₂……全地点のフラックス平均値は 562 mg CO₂ m⁻²h⁻¹ であり、パシルマヤンでの P1 および P2 地点での3年間平均値よりも大きかった。しかしパシルマヤンでも、乾期よりも雨

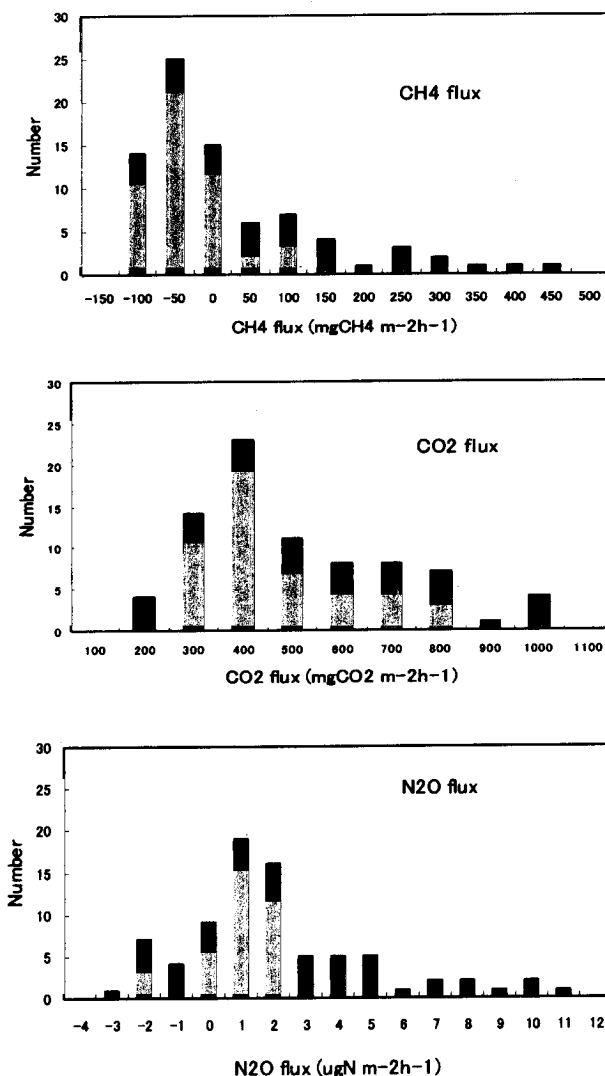


図6 パシルマヤンの 80 地点における CH₄ (上段)、CO₂(中段)、N₂O(下段)フラックスの頻度分布。横軸の数値はフラックス巾の最小値を表す(例えば CH₄ の場合、50 は、50≤f_{CH₄}<100 を意味する)

期に大きくなり、L1地点では2000年以降に $500 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ を示すこともあった(図4参照)。

これら3つの温室効果ガスフラックスの間には、有意な相関は見られなかった。これは、それぞれのガスの生成・分解機構が相互に関係せず、独立していることを示唆している。なお、シロアリは、腸内でセルロースを分解されるので、 CH_4 だけでなく CO_2 も生成されるので、シロアリの影響を受けた地点では、両方のフラックスが大きい可能性がある。しかし、この80地点のデータでは、正の CH_4 フラックスが大きくても CO_2 のフラックスが常に大きいとは限らなかった。これは、土壌中の CO_2 濃度はもともと高いので、シロアリの影響が CH_4 ほどはっきりとした濃度差に表れなかったためとも考えられる。また、 CO_2 の生成が別の要素、たとえばその土壌の有機物量が非常に多かったためかもしれず、同位体比の分析により、発生源を同定する予定である。

(4) ジャンビ州での広域調査による温室効果ガスフラックスの空間変化

① 土地利用形態別の変化

ア N_2O …土地利用形態別の温室効果ガスフラックスの平均値を図7に示した(全ての土壌タイプを含む)。3つの温室効果ガスの中で、最も違いが明確だったのは、 N_2O であった。 N_2O フラックスの平均値は $15 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 以下であり、最小は草地(アランアラン)で $1.4 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ とほとんど発生が見られなかった(図8(上段)参照)。これは、土壌内で生成がないことを示唆しており、過去に実施した土壌ガスの鉛直分布で、草地では地表から深さ30cmまで大気中の濃度と同じで、生成も消滅も見られなかったこととよく一致した。つぎに N_2O フラックスが小さかったのは、一次林(2地点とも火山灰土)で $3.5 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ であり、火山灰土ではないパシルマヤンの一次林とほぼ等しかった。また、すべて火山灰土であるシナモン園は $5.9 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ で小さかった。これから、火山灰土は他の土壌タイプよりも N_2O フラックスが小さかったと推測され、フラックスの異なる要因として土壌タイプも考慮する必要がある(サブ課題(3)で詳しく述べる)。択伐林は、図8(中段)のようであるが、A1地点は、沖積土で非常に肥沃であり東部の泥炭湿地林に近いので、A1地点を除いた択伐林4地点の平均フラックスは $8.63 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ であり、パシルマヤンのL2地点の値と大きな違いはなかった。

ゴム園での N_2O は、B1(沖積土壌)での大きなフラックスを除けば、平均は $8.56 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ で択伐林より小さかったが、図8に示すように地点によりフラックスは大きく変化した。しかし、フラックスの小さい火山灰土のB12を除くと、生育年数が15年以上ではそれ以前の比較的若いゴム園よりも N_2O は大きいと推測される。この原因は、林床の植生が多くなることや土壌の硝化速度の違いなどによると考えられる。図中でフラックスが小さい地点は下草が少なく、大きい地点は下草が多い傾向にあった。なお、パシルマヤンでの長期調査でのゴム園は、生育年数が5年ぐらいであり、フラックスは、これら10年以上の地点の平均値よりも小さかった。これから、ゴム園での N_2O フラックスは、生育初期は小さいが、年数が10~15年以上になると次第に大きくなって択伐林でのフラックスに近くなるが、それは林床植生状態にも影響されると推測された。一方、油ヤシ園での N_2O フラックスは、図9に示すように、非常に大きかったA2地点を除いた4地点での平均フラックスは $7.08 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ と小さかった。また、生育年数が10年以上になると、3~5年のものより小さくなると推測された。これは、生育初期は肥料の影響が大きいと推測される。A2地点では、図10に示すように、7ヶ所中の4ヶ所点はその平均値が $4.30 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ と非常に小さかったのに対して、他の3ヶ所は $50\sim70 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ と非常に大きく、施肥の影響

と推測された。油ヤシ園では、生育時期に関係なく下草が少ないので、生育初期から表層土壌の多くの部分は裸地化して固くなり、 N_2O の生成にとって不利な条件となるためと推測される。イ CO_2 ……土地利用形態別のフラックス平均値は、図7（中段）に示すように、油ヤシ園で、他よりも小さかった。これは、前述したように油ヤシ園では下草がないところが多いこと、また、土壌が非常に固く微生物活動が制約されるため、と推測される。油ヤシ園を除いた5種類の土地利用形態での平均値は $603 \mu gCO_2 m^{-2}h^{-1}$ で、有意な差はみられなかった。なお、パシルマヤンでの CO_2 フラックス値と比較すると、広域調査のほうがやや大きかった。これは、広域調査が9月だけであったのと、採取法の違いによるものとみられるが、正確な原因は現時点では不明である。

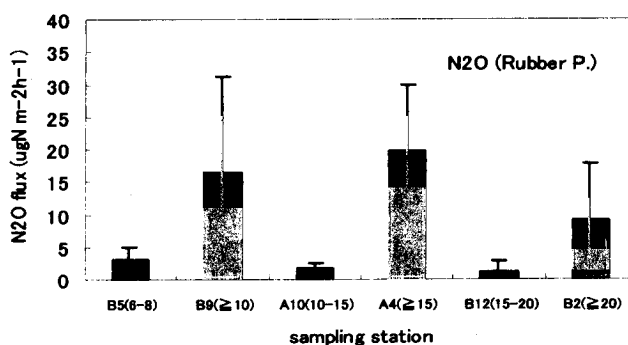
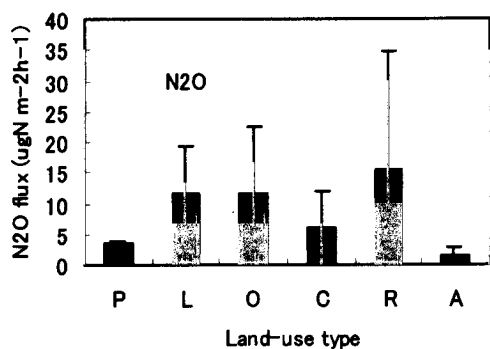
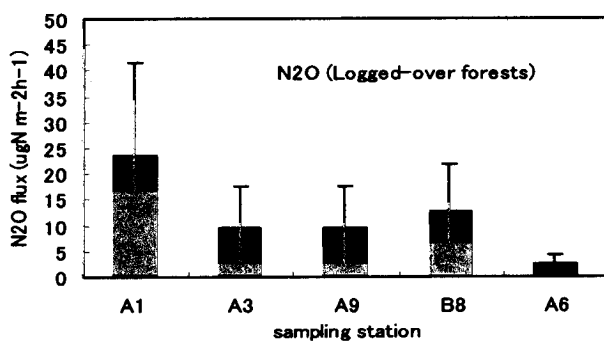
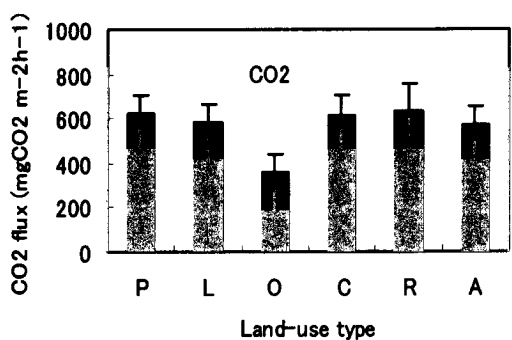
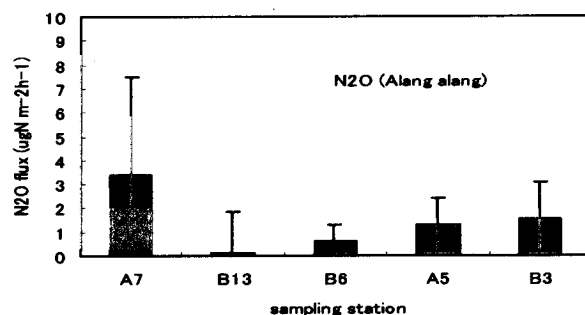
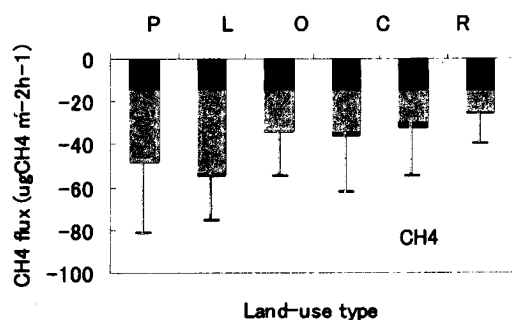


図7 ジャンビ州広域調査での土地利用形態別の温室効果ガスフラックスの平均値 CH_4 (上段)、 CO_2 (中段)、 N_2O (下段)。土地利用形態は、P(一次林)、L(択伐林)、O(油ヤシ園)、C(シナモン園)、R(ゴム園)、A(草地)

図8 ジャンビ州広域調査での土地利用形態別の N_2O フラックス。草地 (上段)、択伐林 (中段)、ゴム園 (下段、横軸の地点名の () 内の数値は、概略の生育年数)。

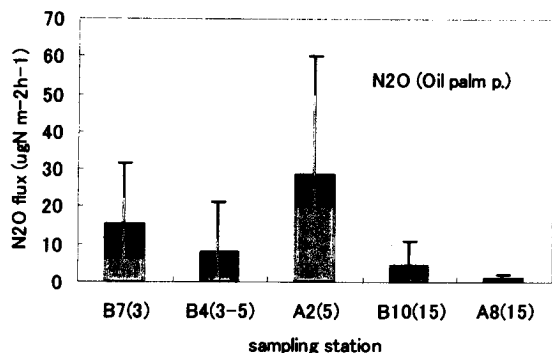


図9 油ヤシ園での N₂O フラックス。横軸の地点名の () 内の数字は概略の生育年数

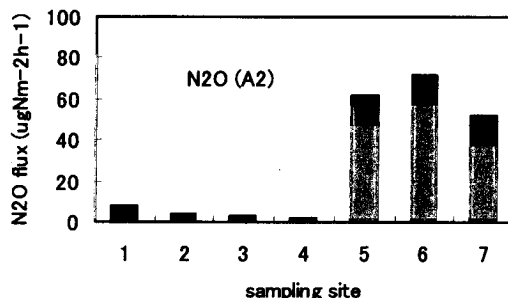


図10 油ヤシ園の A2 地点の 7カ所における N₂O フラックス

ウ CH₄…土地利用形態別のフラックス平均値は全て負であり、ゴム園で最小であった。これは、ゴム園の 7 地点のうち、4 地点で正のフラックスが測定されたためである。広域調査では、フラックスが有意な正の値を示した採取地点数は全地点数 189 のうちの 19 で約 15% であり、最大値は 448 mgCH₄m⁻²h⁻¹ であった（これらの多くはシロアリの影響と推測された）。土地利用形態別では、シナモン園を除く全ての土地利用形態で、正の CH₄ フラックスがみられた。

そこで、これらの正の値を除いた、土地利用形態別の CH₄ フラックス平均値を図 7 (上段) に示した。これによれば、CH₄ の吸収フラックスは、一次林と択伐林で最大、草地で最小、油ヤシ園とゴム園およびシナモン園では、その中間の値であった。この土地利用形態別の CH₄ 吸収は、パシルマヤンでの測定結果と定性的には一致した。これは、土壤の微生物活性が、森林土壤で大きく、プランテーション化によって小さくなり、草地(アランアラン)ではさらに小さくなる、ということを示唆している。

② 土壤タイプ別…採取地点が東部の平坦地域で沖積土に存在したのは、A1 と B1 であり、火山灰土は西部の山岳地帯の 7 地点であった。これら 9 地点での N₂O フラックスを図 11 に示した。

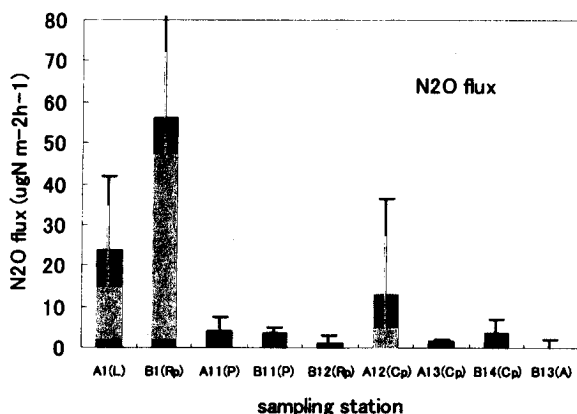


図11 沖積土 2 地点(A1,B1)と火山灰土 7 地点(A11~B14)での N₂O フラックス。横軸の () 内の英字は土地利用形態の略称。

表 4 土壤タイプ別の温室効果ガスフラックスの平均値

土壤タイプ	地点数	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
		(µgCH ₄ m ⁻² h ⁻¹)	(mgCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	(µgN m ⁻² h ⁻¹)
沖積土	2	-35.45	676.3	39.71
火山灰土	7	-36.82	611.7	3.72
その他の土壤	18	-37.37	496.6	8.26

図 11 からわかるように、沖積土の 2 地点はフラックスは大きかったが、火山灰土ではそれらに比べて非常に小さく、A12 を除いた 6 地点は $4 \mu\text{gN m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 以下であった。火山灰土の地点では、4 種類の土地利用形態が存在したが、それらに関係なくフラックスが小さかったことは、火山灰土に関しては、土地利用形態よりも土壌タイプがフラックスに及ぼす主要因であることを示唆している。なお、正の値を除いた CH_4 の吸収フラックスは、表 4 に示すように土壌タイプに関係なかったが、 CO_2 はその他の土壌で最小であった。これは、フラックスが最小であった 5 地点の草地がすべてここに含まれていたためと推測された。

(5) 他の熱帯地域での N_2O フラックスとの比較

これまでに測定された世界の熱帯多雨林における N_2O 発生量は、 $0.01\text{--}7.68 \text{ kgN ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ の範囲にある。熱帯アジアで初めて測定した本調査結果によれば、インドネシアスマトラ島パシルマヤンの湿潤熱帯林（一次林）土壌からの N_2O 発生量は、 $0.13\text{--}0.39 \text{ kgN ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ と推定され、世界の熱帯地域では非常に小さい値であることが明らかになった。また、世界の熱帯多雨林土壌からの平均発生量は $136.4 \text{ mgN m}^{-2}\text{y}^{-1}$ と推定されているが、本調査結果によれば、インドネシアのスマトラ島パシルマヤンの 1 次林および択伐林からの N_2O 発生量は、 $25.8\text{--}62.5 \text{ mgN m}^{-2}\text{y}^{-1}$ と推定された。この値は世界の平均値の約 20~45% であり、IPCC を含むこれまでの熱帯林土壌からの N_2O 発生量は、過大に見積もられていたことが明らかになった。また、広域調査結果で得られた火山灰土の一次林（2 地点）、および択伐林（A1 を除く 4 地点）の土壌からの N_2O フラックスを年間発生量に単純に換算すると、それぞれ 32.6 、 $76.0 \text{ mgN m}^{-2}\text{y}^{-1}$ と推定された。これらの値も、パシルマヤンと同様に、世界の平均発生量よりも非常に小さかった。

このように、スマトラ島の湿潤熱帯林土壌からの N_2O フラックスが他の熱帯地域よりも小さい理由は、サブ課題（3）で詳細に解析されているように、非火山灰土では、肥沃でない酸性土壌のために硝化速度が世界の他の熱帯地域よりも非常に小さいため、と推測された。しかし、火山灰土で N_2O フラックスが小さい原因は、これから解明すべき研究課題である。

5. 本研究により得られた成果

(1) スマトラ島の湿潤熱帯林地域では、熱帯林が伐採・焼却されてその後植林されていく過程で、 N_2O の発生は焼却後急激に増加したがその後ゆっくりと減少し、 CH_4 吸収フラックスは焼却後ほとんど 0 となったがその後次第に大きくなり、どちらも約 2 年半後には伐採前のレベルに戻ったことが、本調査ではじめて明らかになった。この回復速度は、中米で熱帯林が牧草地に変化すると N_2O の発生は約 10 年間増加した、という結果と大きく異なった。なお、 CO_2 フラックスは、伐採・焼却後に小さくなったが、その後次第に大きくなった。これは、焼却によりリターがなくなってフラックスが減少したためと推測される。

(2) 湿潤熱帯林土壌からの温室効果ガスのフラックスは、 CO_2 および一次林と択伐林の N_2O で乾期に小さく雨期に大きくなる季節変化を示したが、その他の季節変化は明瞭ではなかった。 N_2O の年間発生量は、これまでに中米等で測定された値よりも非常に小さかった。これから、IPCC で推定された熱帯林土壌からの N_2O 発生量は、過大に見積もられていることが明らかになった。

(3) 熱帯林土壌では、しばしば CH_4 が土壌から大気中へ放出されていた。この原因はおもにシロアリが放出していると推測され、今後、安定同位体比を用いて解明する予定である。

(4) ジャンビ州内での広域調査によれば、土壌からの N_2O フラックスは、東部の沖積土で最大で、西部の火山灰土では最小であった。ジャンビ州中部のそれらと異なる土壌タイプの地域では、ゴム園では生育年数とともに大きくなる傾向があったが、油ヤシ園では施肥の影響を除けば、生育年数に関係なく小さかった。

(5) 広域調査によれば、 CO_2 フラックスは、油ヤシ園で最小であり、生育年数に関係なく下草が少なく土壌が固いためと推定された。その他の土地利用形態では、大きな差は見られなかった。一方、 CH_4 の吸収フラックスは、土壌タイプによらず、土地利用形態によって異なり、択伐林および一次林、油ヤシ園・ゴム園・シナモン園、草地の順に大きかった。

(6) 以上の結果から、熱帯アジアのインドネシアの陸域生態系土壌からの N_2O の発生量は他の熱帯地域と大きく異なっており、その発生・吸収要因は土地利用形態および土壌タイプによることが、はじめて明らかになった。

[国際共同研究等の状況]

IGBP の IGAC (国際地球大気化学研究計画) の一環として実施中であり、インドネシアの BIOTROP-GCTE-IC-SEA、ボゴール農業大学 (Prof. D. Murdiyarso and Prof. I. Anas) との共同研究である。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上发表(学術雑誌)

- ① D. Murdiyarso and H. Tsuruta (eds): ICSEA and NIAES (2000).
“The impacts of land-use/cover change on greenhouse gas emissions in tropical Asia”
- ② Tsuruta, H., S. Ishizuka, S. Ueda and D. Murdiyarso: in Proceedings of The impacts of land-use/cover change on greenhouse gas emissions in tropical Asia, (eds) D. Murdiyarso and H. Tsuruta, ICSEA and NIAES, 7-16 (2000).
“Seasonal and spatial variations of CO_2 , CH_4 , and N_2O fluxes from the surface soils in different forms of land-use/cover in Jambi, Sumatra”.
- ③ Ishizuka, S., H. Tsuruta and D. Murdiyarso: in Proceedings of "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 (2000).
“Relationship between the fluxes of greenhouse gases and soil properties in a research site of Jambi, Sumatra”
- ④ Ishizuka S., Tsuruta H., Murdiyarso D: Global Biogeochem. Cycles.
“ CO_2 , CH_4 and N_2O emissions and soil properties at four land-use types in Sumatra, Indonesia”. (in press)
- ⑤ Yonemura, S., H. Tsuruta, S. Sudo, S. Kawashima, C.P. Leong, S.Z.Lim and J. Zubaidi: J. Geophys. Res.
“Tropospheric ozone climatology over Peninsular Malaysia from 1992 to 1999” (in press)
- ⑥ Yonemura, S., H. Tsuruta, S. Sudo, C.P. Leong, S.Z.Lim and J. Zubaidi: J. Geophys. Res.
“Annual and El Nino/Southern Oscillation Variations in Observations of In Situ Stratospheric Ozone over Peninsular Malaysia” (in press)

- ⑦ Yonemura, S., S. Sudo, H. Tsuruta, S. Kawashima: J. Atmospheric Chemistry
 “Relations between light hydrocarbon, carbon monoxide, and carbon dioxide concentrations in the plume from the combustion of plant material in a furnace” (in press)
- ⑧ Yonemura, S., H. Tsuruta, T. Maeda, S. Kawashima, S. Sudo, and M. Hayashi: Atmospheric Environment
 “Tropospheric ozone variability over Singapore from August 1996 to December 1999” (in press)
- (2) 口頭発表
- ① 鶴田治雄, 石塚成宏, 上田真吾, D. Murdiyarso: 日本土壌肥料学会 (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」
- ② 石塚成宏, 鶴田治雄, D. Murdiyarso: 日本土壌肥料学会 (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」
- 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.: Second IGBP Congress, Shonan Village, Japan (1999).
 “The Influence of Land-Use/Cover Change on Greenhouse Gas Emission in tropical Asia”
- ④ 鶴田治雄, 石塚成宏, 上田真吾, 林 正康, D. Murdiyarso: 第41回大気環境学会(1999)
 「熱帯アジアの土地利用変化が温室効果ガスの発生・吸収に及ぼす影響(1) --- 湿潤熱帯林とその消失後の土壌からの温室効果ガスフラックスの季節及び空間変化 ---」
- ⑤ Tsuruta, H., Ishizuka, S., Ueda, S. and Murdiyarso, D.: Sixth Scientific Conference of the International Global Atmospheric Chemistry Project (IGAC), Bologna, Italy, September 13-17, 1999
 “The influence of land-use change on greenhouse gas emissions in tropical Asia”
- ⑥ Tsuruta, H., S. Sudo, S. Yonemura, M. Hayashi, Y. Shirasuna, K. Hirano, Nurhayati, D. Murdiyarso, B.H. Saharjo, C.P. Leong, S. Z. Lim, B.J. Zubaidi, and S.L. Woon: IGAC Symposium, at Bangkok, Thailand, 22-23 Jan., 2001.
 “The impacts of biomass burning in tropical Asia on the atmospheric chemistry”
- ⑦ 鶴田治雄, 中島泰弘, 須藤重人, 米村正一郎, 川島茂人, 斉藤元也, 岡本勝男, 石塚成宏, 蒲生 稔, 林 正康, 上田真吾, 犬伏和之, D. Murdiyarso, U. R. Wasrin, I. Anas, L. B. Prasetyo, B. H. Saharjo: 第43回大気環境学会(2001)
 「熱帯アジアの土地利用変化が温室効果ガスの発生・吸収に及ぼす影響(2) --- 湿潤熱帯林と泥炭湿地における温室効果ガスのフラックスの時間・空間変化 ---」
- ⑧ Tsuruta, H.: The 3rd Workshop on land management and greenhouse gas emission in east Asia, APN Project, Los Banos, Philippines, 6-11 Jan. 2002
 “The impacts of land-use/cover change in terrestrial ecosystems of tropical Asia on greenhouse gas emission”
- ⑨ H. Tsuruta, G. Saito, S. Ishizuka, M. Gamo, and K. Inubushi, D. Murdiyarso, U. R. Wasrin, Iswandi Anas: An International Workshop on Land-Use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba 19-21 Feb. 2002.
 “The impacts of land-use/cover change on greenhouse gas emissions in terrestrial ecosystems of tropical Asia”

⑩ H. Tsuruta, D. Murdiyarso, S. Ishizuka, Iswandi Anas, Y. Nakajima, S. Yonemura, S. Sudo: An International Workshop on Land-Use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba 19-21 Feb. 2002.

“The emission of N₂O, CO₂ and CH₄ from soils under different land-use/cover types in Pasirmayang, Jambi province, Sumatra, Indonesia, during 1997-2001”

⑪ Ishizuka S., Iswandi, A., Nakajima Y., Yonemura S., Tsuruta H., and Murdiyarso D.: An International Workshop on Land-Use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba 19-21 Feb. 2002.

“The variation of greenhouse gas emissions from soils and the control of gas emissions at various land-use/cover types in Jambi province”

⑫ Ishizuka S., Nakajima Y., Iswandi A., Tsuruta H., Murdiyarso D.: Proceedings of XVIth International congress of Soil Science, Bangkok, Thailand (August, 2002)

“Greenhouse gas emissions and their control at four land-use types on Sumatra Island, Indonesia”

⑬ Yonemura, S., S. Ishizuka, I. Anas, Y. Nakajima, H. Tsuruta, and D. Murdiyarso: CACGP/IGAC 2002 International Symposium Greece, Sep. 2002.

“The Variation of fluxes of green house gases in different land-use places in central Sumatra, Indonesia”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

①鶴田治雄：農林水産大臣賞受賞「農耕地における温室効果ガスの排出削減技術の確立および技術指導」(平成13年4月7日)

(5) 一般への公表・報道等

①平成13年12月5日の環境省主催の地球環境研究総合推進費シンポジウム「地球温暖化の研究最前線」で、「アジアの農耕地および土地利用変化における温室効果ガスの発生量について」(鶴田治雄)という演題で発表した。

②農業環境技術研究所の欧文年報(Annual Report of National Institute for Agro-Environmental Sciences 2000)にこれらの成果を公表した。

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

今後、報道機関やインドネシアとの合同発表会、また IPCC への報告などを通じ、成果の広報・普及に努める。