

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

② 泥炭湿地における土地利用変化が温室効果ガスの動態に及ぼす影響とその変動要因

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

千葉大学 園芸学部

犬伏和之・古川勇一郎

(研究協力機関・研究者)

Lambung Mangkurat University (LMU), Indonesia

Abdul Hadi

Jambi University, Indonesia

Mochamad Ali

National University of Singapore (NUS)

David Taylor

平成 11~13 年度合計予算額 8, 500 千円
(うち、平成 13 年度予算額 2, 500 千円)

[要旨] 自然湿地からの微量温室効果ガス、メタン発生量は地球全体からのメタン発生量の約 20% を占めると推定されているがその推定精度は低い。また亜酸化窒素については同様な推定がない。熱帯アジアのインドネシアやマレーシア周辺には世界の熱帯泥炭地の約 8 割を占める大規模な湿地が存在しているにもかかわらず、その地域からのメタンや亜酸化窒素の放出に関する研究はほとんどなく、発生量の不確実性を大きくしている原因となっている。また、この地域は潜在的可耕地として急速な大規模農業開発が進められているが、こうした人間活動がメタンなどの温室効果ガス発生量に及ぼす影響についてはまったく解明されていない。本分担課題ではこれら熱帯地域で緊急に現地調査をするとともに、これまで日本で実施してきた発生要因に関する研究をさらに発展させて、熱帯アジアのインドネシアの自然湿地からのメタンおよび亜酸化窒素発生量を総合的に評価するために、現地でメタンおよび亜酸化窒素ガスフラックスを測定した。さらに湿地土壌中のこれらのガス生成および吸収を支配する要因を明らかにすることを試みた。二酸化炭素には大きな変動があり、土地利用変化の影響は水田で低く、2 次林では高かった。2 次林では排水の影響を受け乾燥化が進み、リター分解による放出増加が起こった可能性がある。メタンガスフラックスは概して低く、既報の温帯・冷温帯のメタンガスフラックスより低い傾向にあった。ただし水田化によって増大する場合は認められた。一方、亜酸化窒素は畑耕作によって増加する傾向が見られ、特に非湛水田で高い放出量が認められたのに対して湛水田ではほぼゼロないし微量の吸収が認められた。土地利用変化と降雨変動が地下水位変動を通して、これらのガス代謝に影響を及ぼしていると考察された。

[キーワード] 二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、土地利用変化、熱帯泥炭地

1. はじめに

自然湿地からの微量温室効果ガス、メタン発生量は地球全体からのメタン発生量の約 20% を占

めると推定されているがその推定精度は低い。また亜酸化窒素については同様な推定がない。熱帯アジアのインドネシアやマレーシア周辺には世界の熱帯泥炭地(2900 万ヘクタール)の約8割を占める大規模な湿地(2240 万ヘクタール)が存在している¹⁾にもかかわらず、その地域からのメタンや亜酸化窒素の放出に関する研究はほとんどなく、発生量の不確実性を大きくしている原因となっている。また、この地域は潜在的な可耕地として急速な大規模農業開発が進められているが、こうした人間活動がメタンなどの温室効果ガス発生量に及ぼす影響についてはまったく解明されていない。

2. 研究目的

本分担課題ではこれら熱帯地域で緊急に現地調査をするとともに、これまで日本で実施してきた発生要因に関する研究をさらに発展させて、総合的に温室効果ガス発生量を評価することを目的として、熱帯アジアのインドネシアの自然湿地からのメタンおよび亜酸化窒素発生量を総合的に評価するために、現地でメタンおよび亜酸化窒素ガスフラックスを測定した。さらに湿地土壌中のこれらのガス生成および吸収を支配する要因を明らかにした。

3. 研究方法

インドネシア、カリマンタン島南部およびスマトラ島中部の湿地において、1999～2001年の3年間、11-12月に12箇所を調査を実施した(うち1地点は土壌採取のみ)。これらには自然湿地および一部農耕地として利用されている地点を含む。現地の水位変動、土地利用変化、植生などの情報を収集し、調査地域の特定を行なった。さらに海岸から離れているため海水の影響を受けずメタンおよび亜酸化窒素ガスフラックスが比較的大きい内陸性泥炭地(南カリマンタン州Amuntai市周辺)で、二次林、水田、稲大豆輪作畑地から表層土壌を採取し、その理化学性と微生物性を調べた。各調査地域で、チャンバー法によりメタンおよび亜酸化窒素ガスフラックス測定のためのガスサンプルを採取し、日本に持ち帰ってGCで分析した(Shimadzu GC-14B)。二酸化炭素も同様に定量した(Shimadzu GC-7A)。またガス採取地点の水位および泥炭の深さを現地で測定した。さらにガスフラックスの季節変化を継続して測定した。すなわち南カリマンタン州では2000年11月～2002年1月にランブンマンクラット大学と協力して調査地を設定し、約1ヶ月おきに採取・送付されたガスサンプルを上記と同様に分析した。またジャンビ州では2001年11月～2002年11月にジャンビ大学と協力して、ガスフラックスの季節変化を継続して測定した。湿地土壌を土地利用形態別、深さ別に採取し、理化学性を測定しメタン生成、メタン酸化菌数、脱窒菌数、硝化菌数、セルロース分解菌数を最確値法で計数し、また微生物バイオマスの指標であるATPを化学発光法で定量した。さらに水分含量を含水率60%または湛水状態として2～100日間30℃で室内培養しメタン生成活性、メタン酸化活性および亜酸化窒素の生成活性を測定した。

4. 結果・考察

(1) 広域調査

調査地点の泥炭層と採取土層の深さ・理化学性の概要を表1に示した。全炭素量は約100～620gkg⁻¹と多く、pH(H₂O)は3.0～4.9と酸性を呈した。ガスフラックスのうち、亜酸化窒素の結果は表2、メタンは表3にとりまとめた。亜酸化窒素は畑地化あるいは水田化によって増加する

傾向が見られた。またこれらの値は既報の温帯・冷温帯の亜酸化窒素フラックスより高い傾向にあったが変動は大きかった。一方、メタンガスフラックスは概して低く、既報（表2および3の脚注^{2~5}）の温帯・冷温帯のメタンガスフラックスより低い傾向にあった。

表1 広域調査地点の泥炭層および採取土層の深さ、理化学性の概要

Physicochemical properties of soils used							
Site code	Peat thickness (cm)	Sample depth (cm)	pH (H ₂ O)	pH (H ₂ O ₂)	Total org-C -----g kg ⁻¹ -----	Total N -----g kg ⁻¹ -----	CEC cmol (+) kg ⁻¹
G-1	70-100	0-10	3.8	2.4	612.5	15.0	75.8
		10-20	3.4	1.5	620.2	12.8	92.0
		20-30	3.2	1.4	615.6	8.9	103.2
G-2	10-40	0-10	3.8	2.5	485.5	9.6	132.8
		10-20	3.6	2.0	306.0	4.8	70.6
		20-30	3.8	2.2	338.3	5.9	72.7
G-3	100-200	0-10	3.2		485.7	15.9	103.4
		10-20	3.0		368.3	10.1	71.0
		20-30	3.3		506.3	9.7	108.1
J-4	5-20	0-10	3.3		192.2	10.8	40.5
		10-20	3.6		47.1	4.1	40.8
		20-30	3.2		0.0	1.6	30.3
J-5	15-25	0-10	3.4		240.6	11.8	62.4
		10-20	3.2		73.3	3.6	30.1
		20-30	3.3		79.4	2.1	34.6
B-6	40-50	0-10	3.3	2.7	123.7	5.1	49.2
		10-20	3.2	2.5	235.2	7.1	68.9
		20-30	3.6	2.5	246.9	7.0	52.3
B-7	70	0-10	3.4	2.1	140.8	5.7	43.2
		10-20	3.4		146.6	3.9	44.6
		20-30	3.2		142.9	5.3	44.7
B-8	5-15	0-10	3.6		139.7	5.4	56.6
		10-20	3.4		27.5	4.1	32.2
		20-30	3.5		50.4	4.3	41.3
M-9	20-60	0-10	4.3	2.0	237.6	9.2	61.6
		10-20	4.6	2.4	163.2	9.1	54.3
		20-30	4.7	2.1	140.4	3.9	25.6
A-11	100-200	0-10	4.7	3.0	458.6	15.0	38.0
		10-20	4.3	2.6	507.1	15.3	26.1
		20-30	4.1	2.6	556.4	15.6	29.3
A-12	>200	0-10	4.1		471.9	20.8	37.6
		10-20	4.9		410.5	13.7	65.8
		20-30	4.3		513.6	19.0	53.0

表2 亜酸化窒素ガスフラックスの測定結果

Emission N ₂ O from tropical peatlands in South Kalimantan (Indonesia)					
Site code	Land uses management	N ₂ O emission (mg N m ⁻² h ⁻¹)			
		1998		1999	
		Average values	SD	Average values	SD
G-1	Uncultivated upland	0.12	0.01	-0.03	0.01
G-2	Uncultivated upland	0.01	0.18	0.02	0.01
G-3	Secondary forest			0.04	0.02
J-4	Paddy field (1 year running)			0.03	0.05
J-5	Secondary forest			0.02	0.04
B-6	Paddy field (3 years running)	0.08	0.06	0.04	0.03
B-7	Cultivated upland field (cassava crop 3 years running)	1.04	0.10	0.16	0.07
B-8	Secondary forest			0.10	0.08
M-9	Secondary forest			-0.02	0.02
A-11	Paddy field (2 years running)			0.14	0.13
A-12	Secondary forest			0.03	0.01

Marsh (USA; Goodroad and Keeney, 1984): 0.01-2.30; Bog/Palsa top (Canada; Toda et al., 1994): 0.01-0.17; Natural peatlands (Japan; Tsuruta et al., 1998): 0.00-0.04

表3 メタンガスフラックスの測定結果

Emission of CH ₄ from tropical peatlands in South Kalimantan (Indonesia)					
Site code	Land uses management	CH ₄ emission (mg C m ⁻² h ⁻¹)			
		1998		1999	
		Average values	SD	Average values	SD
G-1	Uncultivated upland	-0.11	0.28	0.03	0.03
G-2	Uncultivated upland	0.80	0.11	0.31	0.16
G-3	Secondary forest			0.04	0.07
J-4	Paddy field (1 year running)			0.12	0.02
J-5	Secondary forest			0.01	0.00
B-6	Paddy field (3 years running)	0.33	0.02	1.04	0.28
B-7	Cultivated upland field (cassava crop 3 years running)	0.28	0.28	-0.08	0.11
B-8	Secondary forest			0.00	0.01
M-9	Secondary forest			0.02	0.01
A-11	Paddy field (2 years running)			1.95	0.01
A-12	Secondary forest			1.46	0.01

Hummock (Sweden; Holzapfel-Pachorn et al., 1985): 64-5400; Sphagnum peat (USA; Fecher and Hammond, 1992): 24; Natural peatlands (Japan; Tsuruta et al., 1998): 19.6

(2) 内陸性泥炭地での土地利用変化が理化学性、ガス関連微生物性に及ぼす影響

内陸性泥炭地で二次林、水田、稲大豆輪作畑地から表層土壌を採取し、その理化学性(表4)微生物性(図1~3)を調べた。二次林から水田、輪作畑へと土地利用形態が変化すると全炭素量・全窒素量が減少し、微生物バイオマスの指標であるATP(表4)や全細菌数・全糸状菌数(図1)、セルロース分解性細菌数・糸状菌数(図2)が減少する傾向が認められた。また亜酸化窒素ガス生成に関するアンモニア酸化菌・脱窒菌(図3)も激減した。室内培養実験の結果、土壌の含水率が高いほどメタン生成活性と亜酸化窒素生成活性が高まることが確認された。

表4 内陸性泥炭地での実験供試土壌の理化学性とATP含量

Site code	Land-use	Org. C -----g kg ⁻¹ -----	Total N	CEC c(+)mol kg ⁻¹	pH* (H ₂ O)	ATP* umol kg ⁻¹
A-1	Secondary forest	475 ^a	23 ^a	104 ^a	4.4	7.7
A-2	Paddy field	225 ^b	21 ^a	120 ^a	4.6	7.1
A-3	Paddy-soybean rotation field	311 ^b	13 ^a	109 ^a	4.6	1.9

添え字が異なる数値間には Fisher 最小有意差テストで統計的有意差 (P<0.05)あり。

*反復が十分数ないので統計分析は行なわなかった。

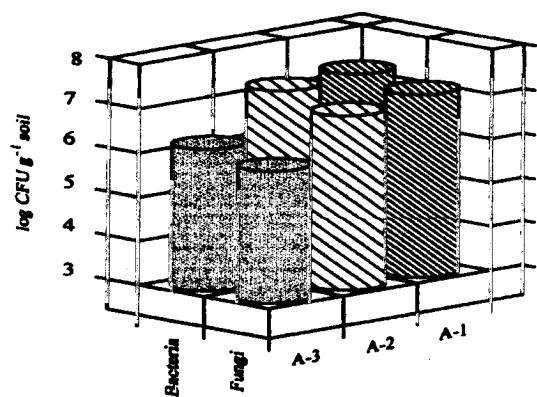


図1 全細菌数・全糸状菌数

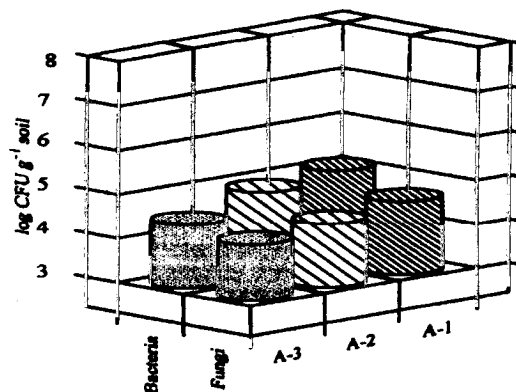


図2 セルロース分解性細菌数・糸状菌数

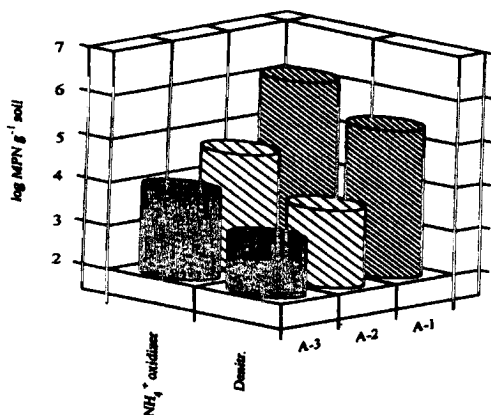


図3 アンモニア酸化菌・脱窒菌数

(3) 南カリマンタン州におけるガスフラックスの季節変化

南カリマンタン州での季節変化を調査した地点は表1のG-1, G-2, G-3の3箇所であり、二酸化炭素・メタン・亜酸化窒素ガスのフラックス測定結果は図4にとりまとめた。二酸化炭素には大きな変動があり、土地利用変化の影響は明瞭ではなかった。メタンガスフラックスは11~3月の水稲作期間を除くと概して低い傾向にあった。一方、亜酸化窒素は微量の放出と吸収が見られたが畑耕作後に変動が増加する傾向が見られた。降水量は12月と3~4月に多く(図5)、メタンフラックスと正の相関関係を示した(図6)。しかし亜酸化窒素は降水量と有意な関係は見られなかった(図7)。

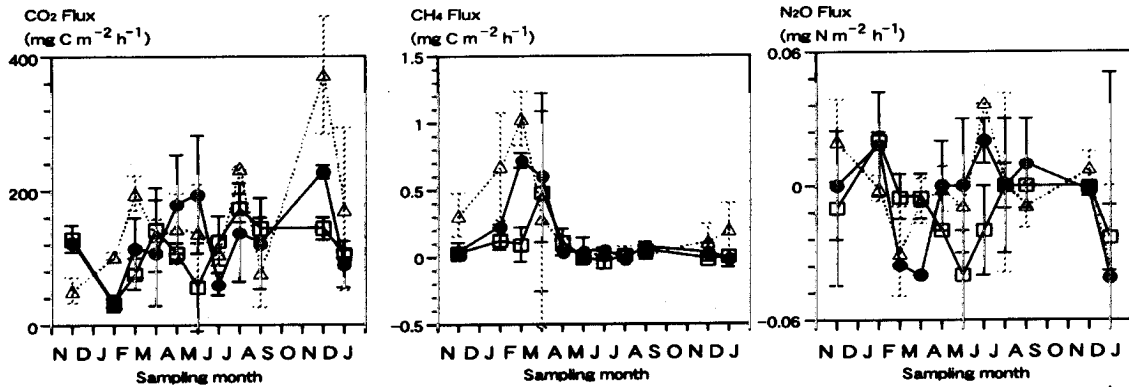


図4 インドネシア、南カリマンタン州泥炭地からのガスフラックスの季節変化

□ G-1 (Upland field) △ G-2 (Paddy field) ● G-3 (Secondary forest)

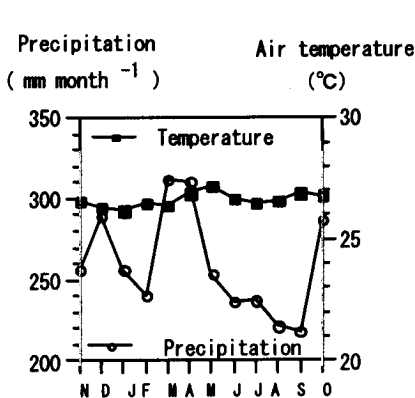


図5 インドネシア、南カリマンタンの気温と降水量

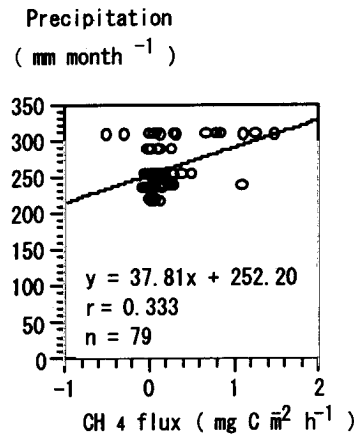


図6 メタンフラックスと降水量の関係 ($p < 0.01$)

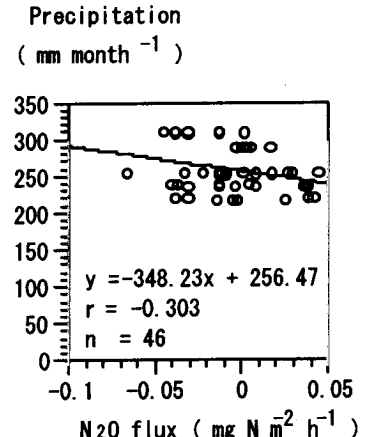


図7 亜酸化窒素フラックスと降水量の関係 ($p < 0.05$)

(4) ジャンビ州におけるガスフラックスの季節変化

ジャンビ州におけるガスフラックスの季節変化を図8に示す。二酸化炭素には大きな変動があり、放出量は土地利用形態別にみると水田で低く、2次林では高かった。2次林では排水の影響を受け乾燥化が進み、リター分解による放出増加が起こった可能性がある。メタンガスフラックス

スは水田でのみ6～10月の水稲作期間に高まったのを除くと他の期間や地点ではほとんど検出されなかった。亜酸化窒素ガスフラックスは畑耕作によって増加する傾向が見られた。特に非湛水田で高い放出量が認められた。一方、湛水田ではほぼゼロないし微量の吸収が認められた。これらの土地利用変化が温室効果ガスの年間放出量に及ぼす影響を表5にまとめた。

二酸化炭素ガスフラックスは地下水位と負の、またメタンフラックスは地下水位と正の相関関係が見出された。亜酸化窒素には明確な関係が見られなかった(図9)。

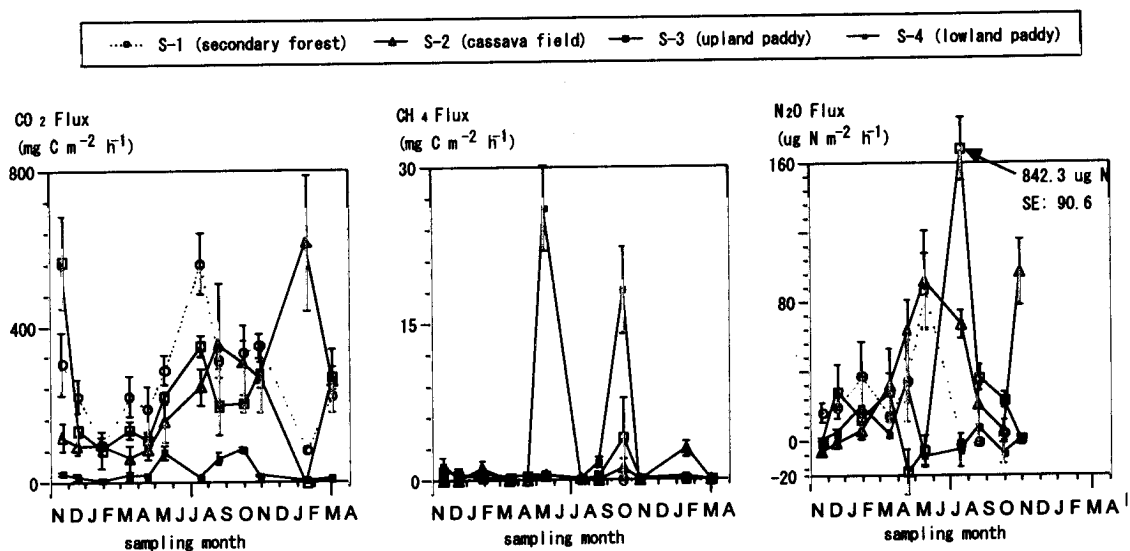


図8 ジャンビ州泥炭地からのガスフラックスの季節変化

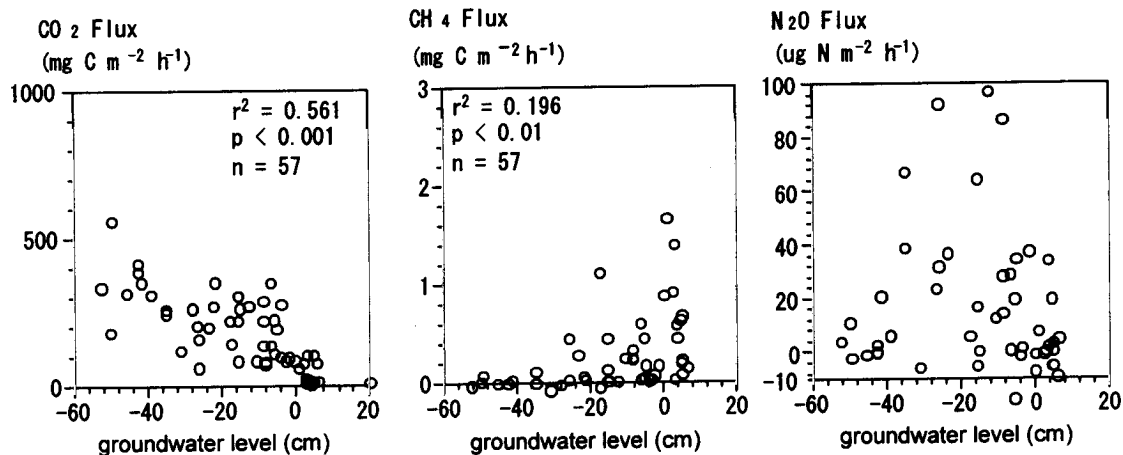


図9 二酸化炭素・メタン・亜酸化窒素フラックスと土壌地下水位との関係(ジャンビ州泥炭地における全データを含む)

表5 熱帯泥炭湿地の土地利用変化が温室効果ガスの年間発生量に及ぼす影響

Site code	Land-use management and Location	S	Total CO ₂ emission	Total CH ₄ emission	Total N ₂ O emission
			(g C y ⁻¹ m ⁻²)	(g C y ⁻¹ m ⁻²)	(g N y ⁻¹ m ⁻²)
S-1	Secondary forest 01.14'31", E 103.37'05"	S	2580 (70) ^c	0.97 (0.33) ^b	106.5 (24.0) ^{bc}
S-2	Cassava field 01.14'38", E 103.38'22"	S	1597 (346) ^{bc}	2.75 (2.38) ^b	330.3 (65.9) ^b
S-3	Upland paddy field 01.14'50", E 103.40'59"	S	1992 (317) ^b	6.05 (5.01) ^b	985.5 (247.3) ^a
S-4	Lowland paddy field 01.14'59", E 103.40'59"	S	307 (65) ^a	48.47 (12.71) ^a	-9.7 (0.9) ^c

数値は3反復の平均標準偏差を示す。同一記号はTukey-Kramerテストで有意差がないことを示す。

5. 本研究により得られた成果

熱帯泥炭地の約8割を占めるインドネシアの大規模な湿地域からのメタンや亜酸化窒素の発生量と、急速な大規模農業開発にともなう土地利用変化がこれら温室効果ガス発生量に及ぼす影響を解明するため3か年の現地調査をインドネシアの大学と協力して行なった。亜酸化窒素は耕作によって増加する傾向が見られ、既報の温帯・冷温帯の亜酸化窒素フラックスより高い傾向にあった。一方、メタンガスフラックスは概して低く、既報の温帯・冷温帯のメタンガスフラックスより低い傾向にあった。二酸化炭素ガスフラックスは地下水位と負の、またメタンフラックスとは正の相関関係が見出された。亜酸化窒素には明確な関係が見られなかった。以上より、これらの温室効果ガス発生量を支配する因子として、降水量や地下水位とそれらに影響を及ぼしている土地利用変化が重要であることを見出した。

6. 引用文献

- 1) Y. Takai: MAB Report, UNESCO Japan, 1996-1997, p.31-49 (1997) "Environmental characteristic and management in peat/acid sulfate soils of Southeast Asia"
- 2) L.L. Goodroad and D.R. Keeney: J. Environ. Qual., 14, 446-452 (1984) "Nitrous oxide emission from forest, marsh, and prairie ecosystem"
- 3) H. Toda, K. Yagi, M. Yoh and M. Takeuchi: Proc. NIPR Symp. Polar Biol., 7, 237-242 (1994) "Measurement of methane and nitrous oxide emissions from the peatlands in northern Quebec, Canada"
- 4) 鶴田治雄、米村祥央、箕毛康太郎、楊宗興、赤木右、和田幸絵、犬伏和之、Abdul Hadi、杉井穂高、木平英一: 尾瀬の総合研究、尾瀬総合学術調査団、p.192-216(1998)「尾瀬ヶ原におけるメタン発生」
- 5) E. J. Fechner and H. F. Hemond: Global Biochem. Cycle, 6, 33-44 (1992) "Methane transport and oxidation in the unsaturated zone of a sphagnum peatland"

[国際共同研究等の状況]

インドネシア、南カリマンタン州のLambung Mangkurat 大学 (LMU) 農学部およびスマトラ、ジャンビ州のJambi 大学農学部と千葉大学園芸学部とは本研究の遂行に当たり覚書を交わし、緊密な連携ができた。さらにジャンビ大学と共同研究を実施していた National University of Singapore (NUS) とも協力して調査することができ、大変有効であった。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① A. Hadi, K. Inubushi, E. Purnomo, F. Razie, K. Yamakawa and H. Tsuruta : Chemosphere - Global changes Sciences, 2, 347-358 (2000) "Effect of land-use changes on nitrous oxide (N_2O) emission from tropical peatlands"
- ② A. Hadi, M. Haridi, and K. Inubushi : Microbes and Environments, 16, 2, 79-86 (2001) "Effect of land-use change in tropical peat soil on the microbial population and emission of greenhouse gases "
- ③ A. Hadi and K. Inubushi : Indonesian Journal of Agricultural Sciences, 1, 25-28 (2001) "Applicability of method to measure organic matter decomposition in peat soils "
- ④ A. Hadi, K. Inubushi, E. Purnomo, Y. Furukawa and H. Tsuruta : Researches Related to the UNESCO's Man and Biosphere Programme in Japan 2000-2001, p. 21-28. (2001) "Emission of CH_4 and CO_2 from tropical peatlands as affected by hydrological zone and land-use management"
- ⑤ S. Otake, Y. Furukawa, K. Inubushi, M. Ali, A. M. Itang and H. Tsuruta : Researches Related to the UNESCO's Man and Biosphere Programme in Japan 2001-2002, p. 32-37. (2001) "Factors influencing methane emission from wetland peat soils"
- ⑥ Y. Furukawa and K. Inubushi : Kalimantan Agriculture, 9, 1 (2002) "Suppression of methane emission from paddy soil by iron materials and its feasibility to tropical peat soil" (in press)
- ⑦ K. Inubushi : Kalimantan Agriculture, 9, 1 (2002) "Biological diversity in wetland soil" (in press)

(2) 口頭発表

- ① A. Hadi, E. Purnomo, F. Razie, K. Yamakawa, K. Inubushi and H. Tsuruta : Jpn. Soc. Soil Sci. Plant Nutr., Annual Meeting, Tokyo (2000) "Emission of greenhouse gases from tropical peatlands", Abstract, p. 209
- ② K. Inubushi, A. Hadi and H. Tsuruta : Jpn. Soc. Soil Microbiol., Annual Meeting, Akita (2000) "Effect of land use management of tropical peatlands on microbial population and emission of greenhouse gases", Abstract, p. 24
- ③ A. Hadi and K. Inubushi : Symposium on Agricultural Sciences and Biochemical Engineering, Tokyo (2001) "Microbial activity involved in decomposition of organic matter in peat soil", Abstract
- ④ K. Inubushi, Y. Furukawa, A. Hadi, E. Purunomo, and H. Tsuruta : 15th International

- Symposium on Environmental Biogeochemistry, Wrocloaw, Poland (2001) Seasonal changes of greenhouse gases in relation to land-use change in tropical peatlands” , Abstract
- ⑤ K. Inubushi and A. Hadi : International Symposium on Plant-Soil Interactions at low pH, South Africa (2001) “Greenhouse gases related microbial activity in tropical peat soil” , Abstract, p. 25
- ⑥ 大武宗一郎、古川勇一郎、犬伏和之、M. Ali、A.M. Itang、鶴田治雄 : 第 17 回日本微生物生態学会、静岡 (2001) 「湿原泥炭土壌におけるメタン生成を支配する要因について」要旨 p. 139
- ⑦ K. Inubushi, S. Otake, Y. Furukawa, M. Ali, A.M. Itang and H. Tsuruta : International Workshop on Land-Use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba, Japan (2002) “Factors influencing methane production in wetland peat soils” p. 15.
- ⑧ Y. Furukawa, K. Inubushi, M. Ali, A.M. Itang, A. Hadi, E. Purnomo and H. Tsuruta : International Workshop on Land-Use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba, Japan (2002) “Effect of Land-use change on seasonal changes of GHG flux in tropical peatland” p. 16.
- ⑨ A. Hadi, K. Inubushi, E. Purnomo and H. Tsuruta : International Workshop on Land-Use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba, Japan (2002) “Emission of N_2O , CH_4 and CO_2 from tropical peatlands” p. 17.
- ⑩ A. Hadi, K. Inubushi, E. Purnomo, Y. Furukawa and H. Tsuruta : 17th International Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand (2002) “Emission of CH_4 and N_2O from tropical peatland and factors affecting them” (アブストラクト受理済み)

(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