

植林マングローブ域における微量温暖化ガス (N_2O) 放出の可能性

今 村 正 裕*・立 田 穰**

マングローブ等熱帯沿岸生態系の保全・修復による温暖化ガス吸収・放出抑制技術を, 東南アジアとのクリーン開発メカニズム事業のオプションとするためには, CO_2 だけでなく GWP 値の高い微量温暖化ガス (CH_4 , N_2O) も考慮した温暖化ガス吸収・放出抑制量評価技術の開発が必要である。著者らはこれまで, 自然林における N_2O 発生量評価方法について検討してきた。本研究では植林されたマングローブ域を対象に, 植林域前面の河川・沿岸海域における N_2O の挙動に関する調査をした。その結果, 植林マングローブ流域からも自然林同等の N_2O 流出 (特に雨季) が低い可能性が示された。

1. はじめに

マングローブ等熱帯沿岸生態系の保全・修復による温暖化ガス吸収・放出抑制技術を, 東南アジアとのクリーン開発メカニズム事業 (CDM) のオプションとするためには, CO_2 だけではなく GWP (Global warming point, IPCC1994) の高い温暖化ガス (100 年換算, CO_2 : 1, CH_4 : 21, N_2O : 310) も考慮した評価が必要である。全球を対象とすると, N_2O の発生量は約 1.9 TgN/y と見積もられ, その約 11% が河川・沿岸地域由来, さらにその 90% つまり全体の約 1 割は中国および東南アジア由来である可能性が報告されている (Seitzinger, 1998)。しかし, その発生量源単位や自然由来における発生のメカニズムには不明な点が残っている (Fluckiger ら, 2002)。

さらに, マングローブ域を対象とした N_2O 発生については知見が少ない。Bauza ら (2002) は, プエルトリコの Magueyes 島マングローブ域からの N_2O 発生を検討し, N_2O の発生が $0.05 \sim 1.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$ と報告している。この値は, 著者らが過去に実施した石垣島吹通川における結果よりも低い値である。しかしながら, N_2O ガスは溶解度が高く, 微生物代謝過程で生成されることから, 温度の影響を受けやすく, 緯度の違いや自然林か植林かといった環境条件の違いによってその生成量が大きく異なると推測される。そのため, 環境因子を包括的に評価した N_2O 収支評価手法, さらに N_2O 制御・抑制技術を考えることが重要な課題である。

著者らは, これまで自然に存在しているマングローブ域を対象に N_2O 発生量の評価方法を検討してきた (今村ら, 2002)。そこで, 本研究では植林されたマングローブ域を対象に, 植林域前面の河川・沿岸海域における N_2O の挙動, さらに堆積物中の N_2O および堆積物境界面からのフラックスについて調査し, 植林マングローブ域における N_2O 発生の可能性について検討した。

2. 調査方法

(1) 調査地点の概要

本研究の対象領域は, ベトナム共和国タンホア省 Len 川流域の植林マングローブ域であり, 赤十字によってメヒルギ (*Kandelia candel*) が植林された場所である。観測対象域は, おおよそ 60 ha であり, 樹齢が 5 年・10 年・15 年のマングローブが存在し, マングローブ林周辺ではアシの栽培収穫も行われている (図-1)。

観測は, 2002 年 9 月 (雨季)・2003 年 2 月 (乾季) および 9 月 (雨季) に実施した。植林域前面の N_2O 濃度分布を把握するため沖合に観測点を設けた, さらにマングローブ領域内からの流出水を採取するために, 林内から河川方向に形成されているクリーク出口を観測点とした。

(2) 海水および河川水中の N_2O 測定

沖合海域の観測では, 最大 9 地点において上・下げ潮時に表層海水を採水した (図-2)。林内河川では, St. A: 上流, St. B: 下流, St. C: 河口の 3 地点で 24 時間 (3 時間隔) の採水を実施した。 N_2O 分析方法・飽和度 (以下, SN_2O) の算出は今村ら (2000) を参考にされた。

一方, 海水中から大気への N_2O ガス Flux の算出は, 一般的に以下の式で与えられる。

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = K_L C \quad \dots\dots\dots (1)$$

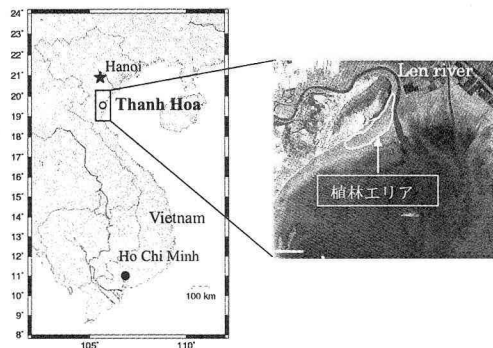


図-1 観測領域図

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境科学研究所 陸・水環境領域
** 農博 (財)電力中央研究所 環境科学研究所 生物環境領域

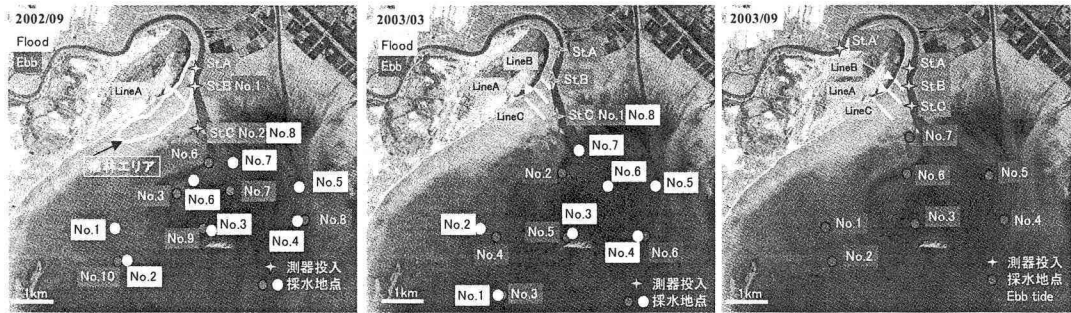


図-2 各月観測地点概要図

ここで、 D は水中におけるガスの拡散係数、 K ガス交換速度、 ΔC は界面近傍における気体の濃度勾配である。ガス交換速度 K の算出にはさまざまな議論があるが、本論で用いた交換速度は、Liss・Merlivant (1986) のCO₂に関する式をもとに、Ledwell (1984) の提案した以下の式を用いて算出した。

$$k_{N_2O} = k_{ref} \left(\frac{SC_{N_2O}}{SC_{ref}} \right)^n \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 SC_{N_2O} は水温と塩分で算出されるシュミット数、 $SC_{ref}=600$ で風速 $U \leq 3.6$ m/s の時 $n = -0.5$ ；風速 $U > 3.6$ m/s の時 $n = -0.67$ の関係を用いた (Liss・Merlivant, 1986)。

(3) 堆積物中のN₂O含有量とフラックス測定

堆積物採取とフラックス測定のため、堰堤(水田と植林域を分ける堤)からマングローブ林内(沖合)へ直行するよう1つ(2002年9月)、それ以外は3つ(Line A, Line B, Line C)の側線を設けた。各ラインは、A:10年生、B:15年生、C:5年生のマングローブ植林区分内と一致する。さらに、2003年9月は海側からマングローブ域沖合縁の堆積物も採取した。

堆積物は、堰堤側マングローブ林淵から2~3地点の等間隔に、表層(0~2 cm)付近の堆積物をバイアル瓶に採取し、HgCl₂ (50% Sat.) 溶液によって生物活性を抑制した。また、直径20 cmの円筒形のチャンパーを用い、堆積物からのN₂Oフラックスを観測した。

3. 結果および考察

(1) 沖合・河川流域におけるN₂O分布特性

各時期のN₂O分析結果を表-1、図-3に示す。最初には、沖合におけるN₂O濃度分布をみると、2002年9月には下げ潮時1.96~8.35 nMの範囲(Ave. 5.50 nM)、上げ潮時4.70~11.14 nMの範囲(Ave. 8.05 nM)であった。同時に観測した水温・塩分から飽和度(以下SN₂O)は、下げ潮時に河口付近および沖合の一部で100%を越え、上げ潮時は沖合で87~169%と高く、河口で64%・

88%(St. 08・St. 07)と低く、下げ潮時の飽和度が高かった。

一方、3月は上げ潮時よりも下げ潮時にN₂O濃度が高く、9月に比べても濃度は低かった。3月は降雨量が少なく、河川流量も9月時より少ないため、マングローブに接触する水も低下し、クリーク流出水中のN₂O濃度も低くなったと考えられる。2003年9月補完調査では沿岸域で高濃度水(13.7 nM (No. 2))が見られ、SN₂Oも約170%と高かった。当地点付近で高濃度・過飽和になる傾向は、2002年9月下げ潮時調査結果とほぼ同様であったが、2003年9月は全地点でSN₂Oが100%を超える結果となった。さらに、海底直上の海水中SN₂Oは139%であり同地点表面水より高かった。このことは、出水によって沿岸に流出した懸濁物が堆積し、堆積物からのN₂O溶出がソースになっている可能性を示唆するものである。

次に、河川水のN₂O濃度を見ると、2002年9月は干潮時に低く満潮時に高く(5.48~8.99 nM)、さらに上流側(St. A)で高くなる傾向であった。同時期のSN₂Oも干満に対応した変化を見せた。しかし、満潮~干潮の間にはSN₂Oは低下傾向であり、再度100%を超える水塊がB⇒Aの順に見られた。その要因の一つとしては、マングローブ林からの流出水がクリークを流れ、堆積物表層に接触した高濃度N₂O水塊が採水地点では遅れて出現するためと考えられる。一方、2003年9月はマングローブ域より上流側に地点を設けた。調査の結果、下げ潮時は全地点でN₂O濃度が高くなり、上流地点のN₂O濃度は、満潮時から下げ潮時に高く、その後は大きな変化がなかった。N₂O濃度が高かった時間帯は、上流地点の流れがほぼ止まっており、下流のマングローブ域からの水が到達していた時期と考えられる。その一方で、下げ潮最大時にも高濃度水が確認できた。また、B地点では下げ潮時に高くなり、2002年9月の観測結果とほぼ同様にマングローブ由来のクリーク水の影響を受けていることが推察される。マングローブ植林では、本観測地のように河口域前面にマングローブを形成させることが多く、沿岸

表-1 沿岸水中の N_2O 濃度と飽和度

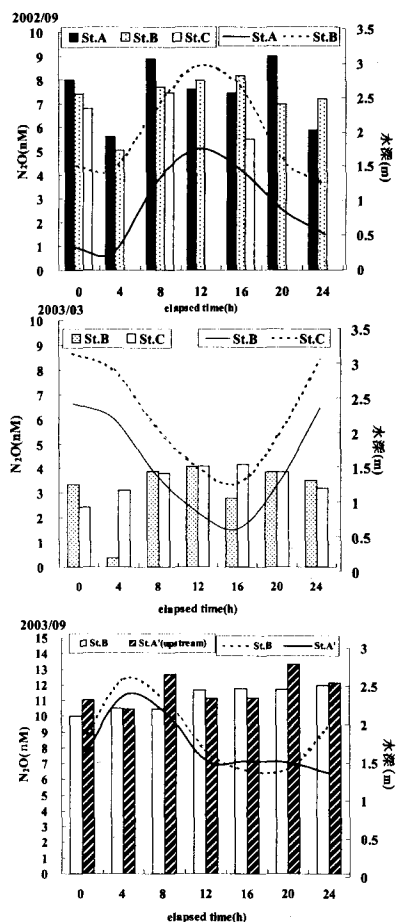
Sep-02	analytical value N_2O (nM)	temperature °C	salinity PSU	theoretical value N_2O_T (nM)	saturation ratio SN2O (%)
ebb-tide					
No. 1 (TB)	8.35	28.9	0.1	7.14	117%
No. 2 (C)	6.94	29.2	0.0	7.09	98%
No. 3	4.14	30.0	0.0	6.94	60%
No. 10	1.96	31.3	4.1	6.58	30%
No. 6	5.47	29.9	0.1	6.95	79%
No. 7	7.53	29.5	4.3	6.89	109%
No. 8	3.30	31.2	3.2	6.62	50%
No. 9	6.30	31.1	3.6	6.64	95%
Ave. 5.50					
flood-tide					
No. 01	6.00	28.4	9.8	6.90	87%
No. 02	7.25	28.7	10.3	6.83	106%
No. 03	10.07	29.3	20.1	6.0	157%
No. 04	11.14	28.6	18.3	6.58	169%
No. 05	10.09	28.2	11.9	6.86	147%
No. 06	8.97	28.3	12.2	6.85	131%
No. 07	4.70	28.0	0.0	7.33	64%
No. 08 (st.C)	6.23	28.0	7.0	7.07	88%
Ave. 8.05					
Mar-03					
ebb-tide					
No. 1 (st.C)	6.09	26.0	2.4	7.65	80%
No. 2	6.42	26.1	3.6	7.58	85%
No. 3	4.92	25.6	13.0	7.33	67%
No. 4	5.53	26.0	11.0	7.33	75%
No. 5	6.11	26.7	3.7	7.46	82%
No. 6	5.26	26.2	12.8	7.21	73%
Ave. 5.72					
flood-tide					
No. 1	4.72	24.5	13.9	7.45	63%
No. 2	4.59	24.5	14.4	7.51	61%
No. 3	4.85	24.8	14.1	7.45	65%
No. 4	4.63	24.3	18.7	7.40	63%
No. 5	4.61	24.4	14.9	7.50	61%
No. 6	5.03	24.6	15.2	7.46	67%
No. 7	5.78	25.3	10.1	7.51	77%
No. 8 (st.C)	5.18	25.4	8.9	7.53	69%
Ave. 5.50					
Sep-03					
ebb-tide					
No. 1 (StB)	8.90	25.1	0.1	7.95	112%
No. 2	13.70	23.3	0.1	7.89	174%
No. 3	9.20	27.0	11.3	7.12	129%
No. 4	9.30	28.0	20.9	6.60	141%
No. 5	8.70	28.2	23.5	6.49	134%
No. 5 bottom	8.80	28.7	25.5	6.32	139%
Ave. 9.76					

に流出する河川水がマングローブ林内堆積物に接触したものかどうかを判断することは難しく、化学トレーサーや流動解析による積算が必要である。

ここで、SN2O と水温・塩分との関係を図-4 に示す。2002・2003 年 9 月の雨季は河川流量が多く、河川水中の塩分が低いいため SN2O は水温の変動による変化が卓越している。一方、3 月は水温の上昇にともなって SN2O が上昇する傾向が見られた。ガスの溶解度は水温が高くなると低下するのが一般的であり、この時期における SN2O の上昇は塩分変化による影響が見られた結果である。このような水温・塩分の変化は、海水中から大気中へのガスフラックスに大きく影響するものと考えられる。

(2) 堆積物中の N_2O 濃度

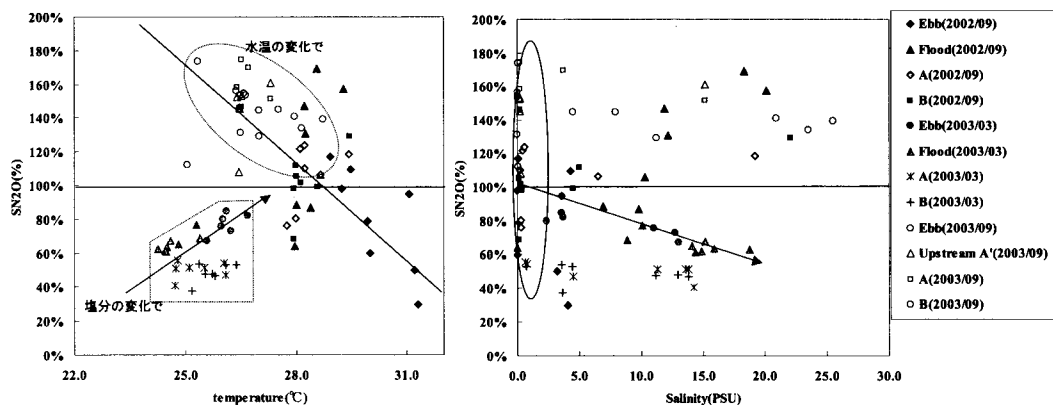
表-2 に堆積物中の N_2O 含有濃度を示す。2002 年 9 月は Line A・B とともに、16.7~24.9 (Ave. 21.2 nM/g 湿泥)、3 月は 1.5~67.7 (Ave. 23.1 nM/g 湿泥) であった。2003 年 9 月は、3 側線とともに 6~8 nM/g 湿泥と低濃度であったが、Line B だけは 10.3 nM/g 湿泥と高い値を示した。側線方向の傾向は、Line B を除けば林内中央付近で高く、沿岸縁付近で低下する傾向であった。また、2003 年 9 月沖合縁では、堰堤付近のそれとほぼ同じ値で

図-3 河川水の N_2O 濃度 (24 時間)

あったが、Line B 延長上の地点だけ 9.9 nM/g 湿泥と高い値を示していた。

過去に著者らが実施した測定結果と比較すると、吹通川流域 (Ave. 59.6 nM/g 湿泥) より低く、トラート (タイ国) 流域 (未発表: Ave. 11.8 nM/g 湿泥) より高い結果となった。9 月と 3 月では潮位も異なり、雨季 (9 月) には堆積物と海水との接触量も多く、 N_2O 含有の高い堆積物表層が乱され流れることで N_2O 含有量も低く、乾季 (3 月) には逆に高くなる傾向になったと考えられる。Puerito Rico の Red Mangrove では、潮位変動の大きさ・栄養塩濃度の変化によって、堆積物からの N_2O フラックスが数倍異なるといった報告もある (Bauza ら, 2002; Munoz-Hincapie ら, 2002)。このことから、高濃度の栄養塩を含む海水が間欠的に被覆するような堆積物の場合は、 N_2O フラックスも大きくなることが懸念される。

加えて、沖合海底堆積物中 (2003 年 9 月) の N_2O 含有量は、No. 3 が最も高く (54.8 nM/g 湿泥)、陸に近いほ

図-4 N₂O 飽和度と水温・塩分の関係

ど低下する傾向を示した (B 地点では 1 nM/g 湿泥以下)。マングローブ域で捕捉できなかった堆積物や河川からの懸濁物が沖合付近 (No. 3) にたまり、N₂O も蓄積されていることが示唆された。

4. 植林域マングローブからの N₂O 放出量

河川および沿岸海域中から大気中への N₂O フラックスを算出した結果、2002 年 9 月は 75 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$)、3 月は -235 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$) さらに 2003 年 9 月は 168 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$) であった。海水中の N₂O 濃度・飽和度ともに 2003 年 9 月が最も高く、フラックスも高くなった。一方、3 月は水温が低く N₂O ガス溶解能力が高いため、負のフラックスとなったと考えられる。

次に、干出時に堆積物中からチャンバーによって直接 N₂O フラックスを測定した結果、2002 年 9 月に 4~72 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$) であり、近隣 (タイ) のマングローブ林と同等の値を示した。本観測では、非植林地域を観測していないが、植林マングローブ内でも N₂O 放出のポテンシャルがあることがわかった。

さらに、堆積物中の N₂O 含有量および地温 (気温・水温) の関係から大気へのフラックスを算出した。各観測ともに地温のデータはないがマングローブ堆積物が干出時にはほぼ水がある程度覆っている状態なので、水温と濃度差から算出した。採取した地点それぞれにおいて、フラックスを算出し時期ごとに平均をとった。その結果、2002 年 9 月は 59.6~103.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$ (Ave. 83.4) でありチャンバーで実施した結果とほぼ同様程度の値であった。一方、2003 年 3 月は -22.6~330 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$ (Ave. 93.5) とばらつきが大きく、堆積物状況 (含水比・粒度等) によって変化していると考えられる。沿岸縁付近は潮流によって乱れの影響を大きく受けることから、N₂O 濃度も低い傾向であった。最後に、2003 年 9 月はもっとも低く -3.6~56.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$ であり、中央付近で高く

表-2 堆積物中 N₂O 含有量とフラックス

		堰堤からの距離	nM/g 湿泥	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$
Sep-02	Line A	170 m	22.0	87.7
		100 m	24.9	103.1
		125 m	16.7	59.6
	Line B			
Mar-03	Line A	0 m	16.1	56.4
	Line B	0 m	67.7	330.0
	Line C	50 m	7.4	10.3
		250 m	1.2	-22.6
Sep-03	LineA	0 m	8.7	17.0
		100 m	11.9	34.0
		200 m	7.8	12.5
		沖合縁	7.5	11.1
		0 m	10.3	25.7
	LineB	100 m	6.4	5.1
		200 m	4.8	-3.6
		沖縁	9.9	23.8
		0 m	6.0	3.0
		100 m	13.6	43.0
	LineC	200 m	16.0	56.0
		沖縁	6.1	3.2
	sea bottom sediments			
	B		0.7	
		No. 1	8.1	
		No. 2	18.1	
		No. 3	54.8	

なる傾向を見せた。

Frankenら (1992) が行った湿地帯 (常に水が浸っている) における N₂O フラックスも幅があり、著者らの自然林調査結果 (今村ら, 2002) から縁における濃度低下によって、N₂O フラックスがマイナスになっていたことを考えると、植林域においても植林することによる河川・海水との接触量や堆積物表面の洗い出し等を考慮し、N₂O フラックスを評価する必要があると考えられる。

5. ま と め

本研究では植林されたマングローブ域を対象に、植林マングローブ域における N₂O 発生の可能性について検討した。以下に、結果をまとめる。

(1) 沖合・河川流域における N₂O 分布特性

Len 川流域では、マングローブ植林域クリーク流出水の 24 時間観測結果から、潮汐に応じた N₂O 濃度の変化 (1. 下流より上流部における N₂O 濃度が高い, 2. 下げ潮時にクリークからの高 N₂O 水が遅れて河川へ流出している) があることがわかった。さらに、上流地点の観測

結果から、満潮時とすこしずれてマングローブ域由来と考えられる高濃度水が観測された。本調査時期は、降雨があり N_2O 濃度もほぼ飽和値以上の値を示した。また、水温・塩分・SN20 の関係から、雨季には水温の変動が、乾季には塩分の変動によって大きく飽和度が変化していること確認でき、海水中から大気中へのガスフラックスに大きく影響するものと考えられる。

(2) 堆積物中の N_2O 濃度とフラックス

2002 年 9 月は Ave. 21.2 nM/g 湿泥, 3 月は Ave. 23.1 nM/g 湿泥, 2003 年 9 月は, 3 側線ともに 6~8 nM/g 湿泥と低濃度であったが, Line B だけは 10.3 nM/g 湿泥と高い値を示した。側線方向の傾向は, Line B を除けば林内中央付近で高く, 沿岸縁付近で低下する傾向であった。さらに, 沖合海底堆積物の採取によって, 海底堆積物中の N_2O 含有量がかなり高いことがわかった。その性状はマングローブ林内のそれとほぼ同様であり, それらが堆積している可能性がある。

(3) 植林域マングローブからの N_2O 放出量

河川および沿岸海域の N_2O 濃度から大気へのフラックスを算出した結果, 雨季は接触量も多くさらには, 水温も高いことから N_2O が大気へ放出されている可能性がある。一方, 堆積物中からの直接 N_2O フラックスを測定した結果, 近隣 (タイ) のマングローブ林と同等の値を示した。非植林地域を観測しているわけではないが, 植林マングローブ内でも自然林同等のポテンシャルがあることがわかった。さらに, 堆積物中の N_2O 含有量から大気へのフラックスを算出した結果, 堆積物状況 (含水比・粒度等) でばらつきが見られるものの, 植林域においても植林することによる海水との接触量や林縁の堆積物洗い出し等を考慮し, N_2O フラックスを評価する必要がある。

謝辞: 本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構および (財) 地球環境産業技術研究機構が (社) 日本海洋開発産業協会に委託した「プログラム方式二酸

化炭素固定化・有効利用技術開発 (マングローブ等熱帯沿岸生態系の修復・保全による地球温暖化ガス回収・放出抑制評価技術の開発)」研究費により実施された。

参考文献

- 今村正裕・立田 稔・杉岡伸一 (2002): マングローブ水域と林内堆積物における微量温暖化ガス (N_2O) の挙動, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1366-1370.
- Bauza, J. F., J. M. Morell and J. E. Corredor (2002): Biogeochemistry of nitrous oxide production in the Red Mangrove (*Rhizophora mangle*) forest sediments, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol. 55, pp. 697-704.
- Fluckinger, J., E. Monnin, B. Stttauffer, J. Schwander, T. F. Stocker (2002): High-resolution Holocene N_2O ice core record and its relationship with CH_4 and CO_2 , *Global Biogeochemical cycles*, vol. 16, No. 1, pp. 10-29.
- Franken, R. O. G., W. Vierssen and H. Lubberding (1992): Emission of some greenhouse gas from aquatic and semi-aquatic ecosystem in the Netherlands and options to control them, *The science of total environment*, Vol. 126, pp. 277-293.
- Houghton, J. T., B. A. Callander and S. K. Varney (1992): Climate Change 1992, The supplementary report of the IPCC scientific assessment, Publish for intergovernmental panel on climate change, Cambridge University press, pp. 1-200.
- Ledwell, J. J (1984): The variation of gas transfer velocity with molecular diffusivity, In *Gas Transfer at Water Surface*, W. Brutsaert and G. Jirka (eds), pp. 293-302.
- Liss, P. S. and L. Merlivant (1986): Air-sea gas exchange rates: introduction and synthesis, In *the role of air-sea exchange in Geochemical cycling*, pp. 293-302.
- Munoz-Hincapie, M., J. M. Morell and J. E. Corredor (2002): Increase of nitrous oxide flux to the atmosphere upon nitrogen addition to red mangroves sediments, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 44, pp. 992-996.
- Robertson, K. (1991): Emission of N_2O in Sweden natural and anthropogenic sources, *Ambio*, Vol. 20, No. 3-4, pp. 151-155.
- Seirzinger, S. P. (1998): Global distribution of nitrous oxide production and N inputs in freshwater and coastal marine ecosystem, *Global Biogeochemical cycles*, Vol. 12, No. 1, pp. 93-113.