

## マングローブ林堆積物における有機物とメタンの動態

八巻美樹<sup>1</sup>・鈴木 款<sup>2</sup>・宮坂 均<sup>3</sup>・松井直弘<sup>4</sup>

### Behavior of organic matter and CH<sub>4</sub> in mangrove sediment

Miki YAMAKI<sup>1</sup>, Yoshimi SUZUKI<sup>2</sup>, Hitoshi MIYASAKA<sup>3</sup>, and Naohiro MATSUI<sup>4</sup>

**Abstract** CH<sub>4</sub> is one of the most important greenhouse gas. In tropical and subtropical coastal region, mangroves are actively fixing CO<sub>2</sub> by photosynthesis and regarded as a significant CO<sub>2</sub> sink. On the other hand, it is known that mangrove sediment releases CH<sub>4</sub> to atmosphere. Due to O<sub>2</sub> deficiency in the sediment, which is caused by redundant supply of organic matter and seawater flooding the sediment. Although CH<sub>4</sub> released from natural wetland occupies 20% for all of CH<sub>4</sub> production, pathway and condition of the CH<sub>4</sub> production are still unclear. In this work, we study behavior of organic matter in mangrove sediment, in particular accumulation of organic matter and CH<sub>4</sub> release, at the mouth of Fukido River, Ishigaki Island, Okinawa Prefecture. Although pH was the optimum condition for methanogenesis bacteria (pH 6.4-7.4), redox potential was very high (+185 - +240mV). Total organic carbon in sediment was 6.2±2.7% for sediment dry weight, which shows that this mangrove forest stores much abundant carbon in sediment. The CH<sub>4</sub> release rate *in vitro* experiment was 118 μmol m<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>. This value is negligible compared with total organic carbon reduction rate (2.1mol m<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>). This suggests that CH<sub>4</sub> produced by decomposition of organic matter is minor or that CH<sub>4</sub> is immediately oxidized in sediment.

**Key Words:** mangrove, methane flux, organic carbon

#### 緒言

近年、二酸化炭素やメタンなど、温室効果ガスの大気中での濃度上昇が懸念されている。その対策の一つとして、生態系による二酸化炭素固定が挙げられ、一

次生産速度の速い生態系としてマングローブ域が注目されている。

マングローブとは、熱帯、亜熱帯の潮間帯に生息する塩性植物の総称である(中村, 1998)。マングローブ植物は活発に光合成を行い二酸化炭素を有機物として

<sup>1</sup> 静岡大学理学部生物地球環境科学科, 〒422-8529 静岡市大谷836

<sup>2</sup> Department of Biology and Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan  
E-mail:r0815083@ipc.shizuoka.ac.jp(M.Y.)

<sup>3</sup> 静岡大学理学部地球科学教室 〒422-8529 静岡市大谷836

<sup>4</sup> Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan  
E-mail:seisuzu@ipc.shizuoka.ac.jp(Y.S.)

<sup>5</sup> 関西電力株式会社総合技術研究所環境技術研究センター, 〒661-0974 尼崎市若王寺3丁目11番20号

<sup>6</sup> Environmental Research Center, Technical Research Center, The Kansai Electric Power Company, Inc., 11-20 Nakaoji 3-chome, Amagasaki, Hyogo, 661-0974 Japan

E-mail:K448482@kepco.co.jp(H.M.)

<sup>7</sup> 株式会社関西総合環境センター, 〒541-0052 大阪市中央区安土町1丁目3番5号

<sup>8</sup> Kansai Environmental Engineering Center Co., Inc., Azuchimachi 1-3-5, Chuo-ku, Osaka, 541-0052 Japan  
E-mail:matsui-naohiro@kanso.co.jp(N.M.)

固定するため、二酸化炭素の吸収源として注目されている。また、マングローブ植物が生産した有機物や、その分解産物である栄養塩類は潮流によって海洋へと輸送され、海洋生態系の生産性を活性化させるため、温暖化対策を講じる上で非常に重要な生態系であると言える。しかしマングローブ域の堆積物中からはメタンが放出される可能性が指摘されている(Lu *et al.*, 1999)。マングローブ植物が生産した有機物が堆積物表面へと供給され好気呼吸を促進し、また、海水が浸入して堆積物への酸素供給を遮断するため、堆積物中の酸素濃度が減少し、嫌気呼吸によるメタン生成が起こる。メタンは二酸化炭素以上の温室効果能力をもつ気体である。自然湿地からのメタン放出量は地球全体でのメタン放出量の22%を占めることが報告されている(Watson *et al.*, 1992)。メタンの生成機構や生成条件、大気への放出速度は完全に解明されていない。マングローブ域においてもメタン生成に関する研究例は少なく、Barber *et al.* (1988)、Harriss *et al.* (1988)、Sotomayor *et al.* (1994)、Lu *et al.* (1999) で報告されているのみである。

メタンの生成反応においては、ギ酸、酢酸、エタノールなどの低分子有機物が基質として利用される。加えて、有機物分解により生成されるCO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>も基質として利用されるため、堆積物中の有機物濃度はメタン生成を支配する重要な因子であるといえる(八木, 1994)。また、pHや温度はメタン生成菌の生育に影響を与えるため、堆積物の化学的環境もメタン生成を左右する因子の一つである。本研究はマングローブ域の炭素循環を明らかにするため、特に有機物の動態に着目し、堆積物中の有機物現存量とメタンの生成に関して考察することを目的とする。

## 方法

### 現地観測・観測地点

観測及び堆積物試料の採取は、2000年11月9日から15日と2001年9月10日から16日に沖縄県石垣島の吹通川河口域のマングローブ林で行った。石垣島は北緯24°30′、東経124°25′に位置する。マングローブ域の面積は12.3 × 10<sup>4</sup> ㎡で、日本におけるマングローブ自生地でも最大なものの一つである(日本海洋開発産業協会, 2001)。観測地点は川岸から内陸側に向かってSt.1、St.2、St.3、St.4と一直線上に設置した(図1)。St.1はマングローブ域の最も川側の木の根元、St.2、St.3、St.4のSt.1からの距離はそれぞれ30m、150m、180mである。構成樹種はSt.1ではヤエヤマヒルギ(*Rhizophora stylosa*)のみ、St.2、St.3、St.4ではヤエヤマヒルギが大半で一部にオ

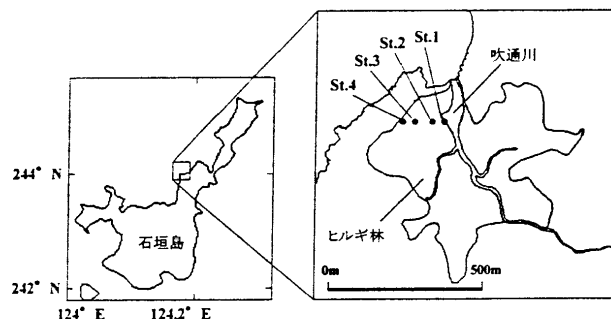


図1 吹通川河口域における調査位置図。

Fig. 1 Study location in Fukido river, Ishigaki Island.

ヒルギ(*Bruguiera gymnorrhiza*)が点在する。なお、全ての観測、サンプリングは干潮時に行った。St.1、St.2、St.3は干潮時には堆積物表面が完全に露出していたが、St.4は干潮時でも数cm冠水しているのが確認された。

### サンプリング方法

サンプリングは日中の干潮時に行った。堆積物は長さ50cm、内径3.6cmのアクリルパイプまたは長さ50cm、内径3.0cmの塩ビパイプを堆積物に垂直に挿し、両端にゴム栓をして堆積物から取り出した。採取した堆積物は直ちに東亜電波製HM-21Pを堆積物表面に直接差し込んで温度、pH、酸化還元電位を深さ10cmまでは1cm間隔で、それ以深は2cm間隔で深さ30cm前後まで測定した。酸化還元電位はHM-21Pの測定値に、温度による補正值を足して算出した。

堆積物中の有機炭素量、有機窒素量測定用のサンプルは内径3.0cmのアクリルパイプで採取し、深さ10cmまでは1cm間隔で、それ以深は2cm間隔で切り分け、冷凍保存した。このサンプルは測定直前に100℃で24時間乾燥させ(横田, 1996)、住化分析センター社製SUMIGRAPH NC-90Aを用い、高温酸化法で測定した。標準試料を用いて測定精度を求めたところ、2%であった。

### 室内実験

メタンの生成速度を求める室内実験の模式図を図2に示す。St.1周辺で採取した深さ10cmまでの堆積物と海水を、体積13lのポリカーボネート製容器に入れて密封し、室温で研究室まで輸送した。輸送期間中、温度の変化や堆積物の攪乱により内部環境が変化している可能性があったため、20℃、暗条件で3ヶ月間静置した。メタン採取用のチャンバーとして、内径9.4cm、長さ20cmのアクリルパイプにアクリル板のふたを接着したものを堆積物の深さ11cmまで差し込んだ。このチャンバー内の気相を、アクリル板に取り付けたゴム栓を通して2.5mlのガスタイトシリンジで採取し、FID検出器を装着した島津製作所製SHIMADZU GC-14Bでメタンの濃度を測定した。また、チャンバー外の堆積物を内径2.6cm、長さ30cmのアクリルパイプで採取し、100℃で24時間乾燥させた後、SUMIGRAPH NC-90Aで有機炭素量を測定した。

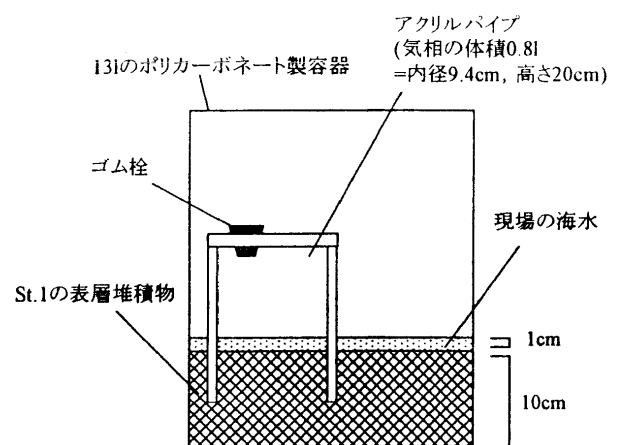


図2 室内実験模式図。

Fig. 2 Schematic illustration of sediment incubation system.

表1 堆積物各深度の温度、pH、酸化還元電位の平均値。  
Table 1 Average values of temperature, pH and redox potential in sediments.

	St.1	St.2	St.3	St.4
Temperature(°C)				
Nov.2000	24.8±0.1	24.7±0.2	24.1±0.2	23.8±0.3
Sep.2001	26.8±0.3	-	-	27.0±0.2
pH				
Nov.2000	6.9±0.1	6.8±0.2	6.5±0.1	6.6±0.2
Sep.2001	7.1±0.1	-	6.7±0.2	7.1±0.3
ORP(mV)				
Nov.2000	194.8±9.0	214.9±12.5	234.3±5.8	225.8±10.0
Sep.2001	204.2±5.2	-	221.3±9.6	202.1±9.5

結果

現地観測結果

温度、pH、酸化還元電位

温度、pH、酸化還元電位を表1に示す。値は各測点の深さ0cmから50cm前後までの平均値とその標準偏差とした。2001年9月は一部のデータを欠損した。温度は2000年11月の結果では、川から離れるほど低くなる傾向があった。2001年9月では、St.1、St.4の差はわずかである。pHの平均値は6.5から7.1で、いずれもメタン生成菌の活動にとって最適とされるpH6から8（滝井、1995）の範囲内であった。酸化還元電位は2001年のSt.3は温度のデータがないため、2001年St.1、St.4の全てのデータの平均温度を補正值として算出した。全測点において+185mVから+240mVと高い値であり、堆積物が酸化環境であることが示唆される。

全有機炭素量

全有機炭素量TOCの堆積物中における鉛直方向の分布を図3に示す。なおTOCは堆積物乾燥重量に対する全有機炭素の重量パーセント濃度である。St.1、St.2においては深度を通して一定の値を示す。一方、St.3は、2000年11月では減少、2001年9月では増加の傾向が、St.4では深さとともに減少する傾向がある。水平方向には、川から離れるほどTOCが蓄積されていることがわかる。これは川から離れマングローブ林の奥に行くほど、干潮時の潮流がマングローブ植物の気根に遮られ、堆積物表面の落葉などが林外へ流出しにくくなるためと考えられる。

全有機窒素量

全有機窒素量TON濃度の堆積物中における鉛直分布を図4に示す。TONは堆積物乾燥重量に対する重量パーセント濃度である。TONは2000年11月、2001年9月どちらの観測でも、TOCと同じ傾向が認められた。すなわち、St.1、St.2では深度であまり変動がなくほぼ一定、St.3は2000年11月には減少、2001年9月では深度毎の変動が大きく、St.4では両年とも減少傾向を示す。TONの水平方向の分布は、TOCと同様川から離れるほど高い値が見られた。

C/N比

C/N比の堆積物中における鉛直方向の分布を図5に示す。St.1、St.2では2000年11月は深度による変動が大きく明確な傾向は見られないが、2001年9月ではほぼ一定でありあまり変動しない。St.3では2000年11月は深さとともに増加傾向を示すが、2001年9月はほとんど変化し

ない。St.4では2000年11月の10cm以深で急激に増加しているが、2001年9月ではあまり大きく変動せずわずかに上昇している。水平方向には、川から離れるほど低下する傾向が見られた。前述の通り、川から離れた地点では堆積物が蓄積されやすく、新鮮でC/N比の低い有機物が多いことがわかる。

室内実験(メタン放出速度及びTOC減少速度)

チャンバー気相中のメタン濃度の時間変化を図6に示す。メタン濃度は実験開始後5日目までは減少し、その後は増加に転じた。5日目以降25日目までの値を用いて、堆積物から気相へのメタン放出速度を求めたところ、 $118 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ となった。また、実験中のTOC量の時間変化を図7に示す。実験開始から減少する傾向が見られ、その減少速度は $2.1 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ であった。

考察

現地の環境

温度、pH、酸化還元電位

メタン生成、制御の要因として、八木(1994)は温度、pH、酸化還元電位、有機物濃度、硫酸還元菌との競合などを挙げている。温度、pHはメタン生成菌の生育に影響し、多くのメタン生成菌にとって最適な温度は20°Cから30°C、最適なpHは6から8とされている。Wang *et al.*(1993)の室内実験では、酸化還元電位が-150mV程度まで低下するとメタン生成が始まり、-230mVまでは対数的に増加することが示された。本研究の温度、pHはメタン生成菌に適した値であったが、酸化還元電位は+185mVから+240mVと高い値であった。マングローブ林では、マングローブ植物が根から酸素を放出しているため、酸化還元電位は高くなる傾向がある(Alongi *et al.*, 2000)。しかし、酸化還元電位の測定は干潮時に行われている。水位は堆積物中の酸化還元電位を決定する重要な要因である。干潮時には直上水がなくなり堆積物へと酸素が供給されて高い酸化還元電位を示すが、満潮時には大気からの酸素供給が絶たれ酸化還元電位は低下する。本研究は酸化還元電位の測定を干潮時にのみ行ったため、満潮時の値は不明である。これらの地点がメタン生成の条件を満たしている可能性については、今後満潮時においてデータを採取し、検討する必要がある。

有機物量

過去の研究例における、堆積物中の全有機炭素(TOC)量とC/N比を表2に示す。本研究の値は2000年11月、2001年9月の観測全ての平均値を示している。マングローブ域の堆積物中には、他の生態系と比較して有機物が豊富に蓄積されていることがわかる。マングローブ域は熱帯、亜熱帯性気候の地域にあり、高い一次生産能力を持つ。また、陸上植物は一般に、海水中の植物プランクトンのC/N比が6から7と低いのに対し、Schlesinger & Lichter (2001)のマツ林での報告(C/N比 $42.7 \pm 1.1$ )が示すように非常に高いC/N比の有機物を生産することが知られている。これらの有機物は堆積物中で分解され、さらにC/N比は高くなる。二酸化炭素固定能力を議論する上で、堆積物中の有機物のC/N比は重要である。二酸化炭素固定に貢献するには、生産された有機物のうち有機窒素のみが速やかに分解されて栄養塩類へと再生され、炭素は有機物のまま堆積

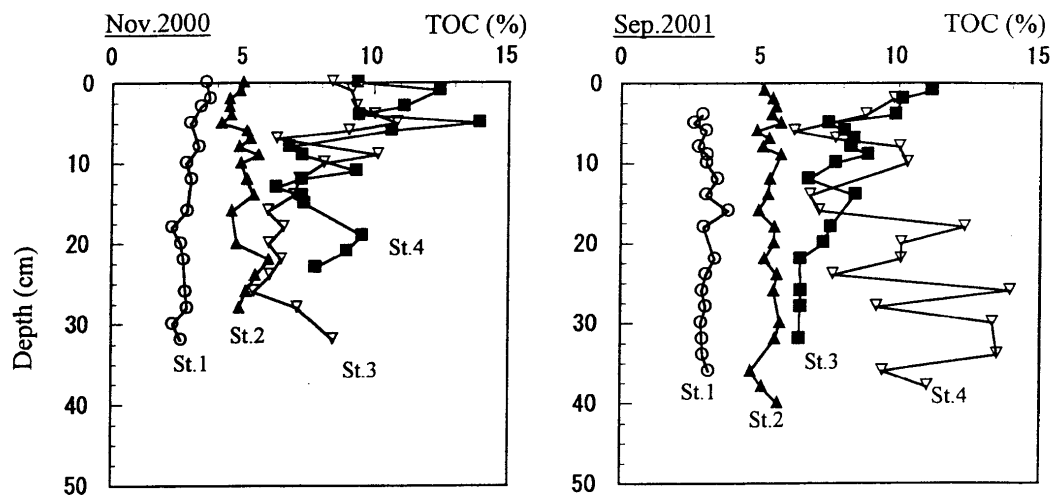


図3 堆積物における全有機炭素(TOC)の鉛直分布.  
Fig. 3 Vertical distributions of total organic carbon (TOC) concentrations in sediments.

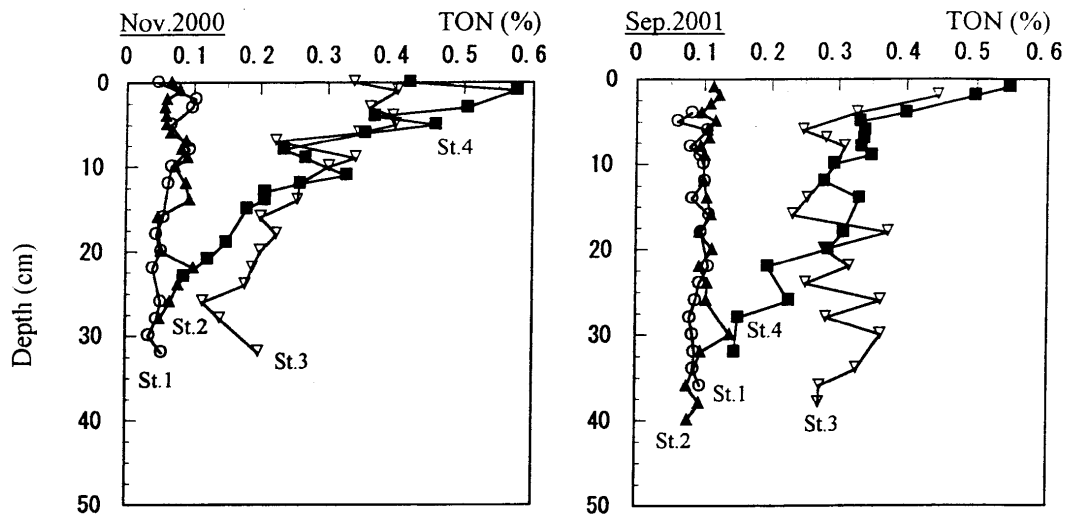


図4 堆積物における有機窒素(TON)の鉛直分布.  
Fig. 4 Vertical distributions of total organic nitrogen (TON) concentrations in sediments.

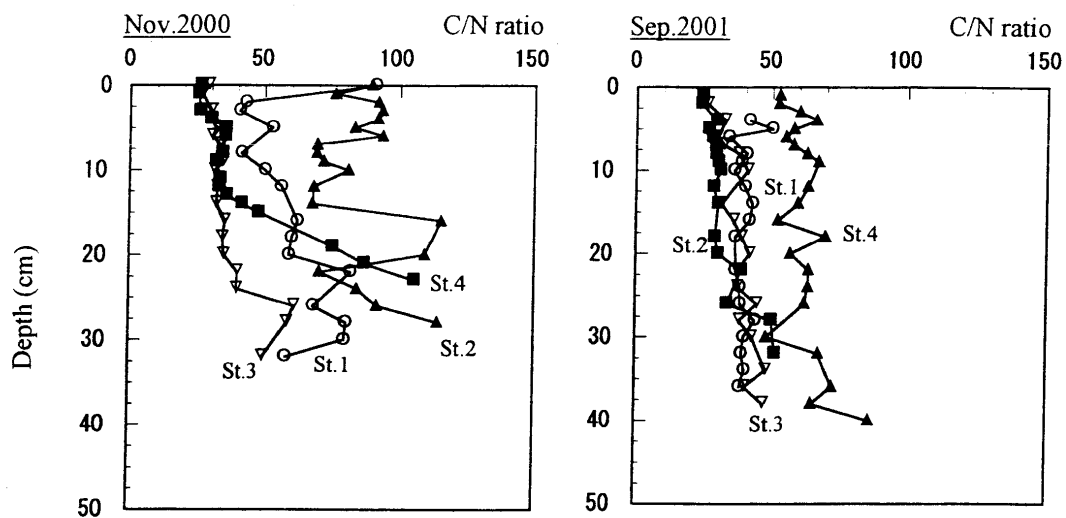


図5 堆積物におけるC/N比の鉛直分布.  
Fig. 5 Vertical distributions of molar C/N ratio in sediments.

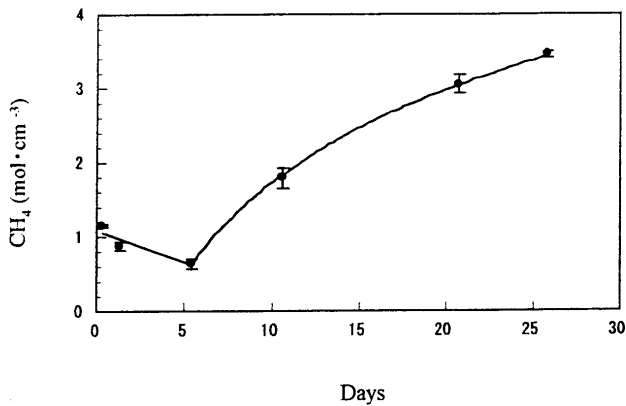


図6 室内実験における気相中のメタン濃度の変化。  
Fig. 6 Variation of methane gas concentration in incubation system.

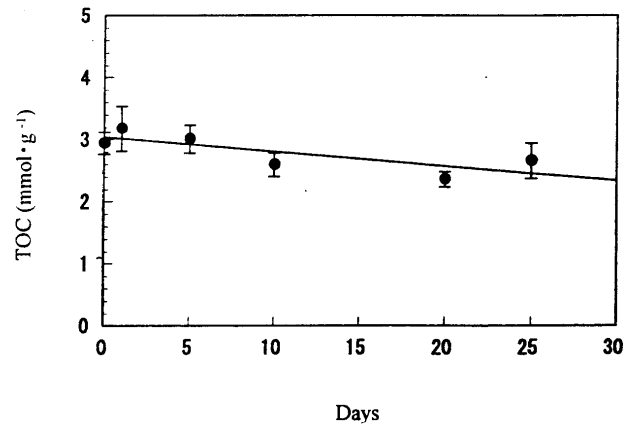


図7 室内実験における堆積物中の全有機炭素(TOC)量の変化。  
Fig. 7 Variation of total organic carbon (TOC) concentration in incubation system.

表2 堆積物における全有機炭素(TOC)量の比較

Table 2 Comparison of total organic carbon (TOC) concentration in sediments of selected ecosystems.

study site	TOC (%)	C/N ratio	
marine sediment, Gulf of Mexico	0.6	-	杉村, 1972
coastal marine sediment, Gulf of Mexico	1.3	-	杉村, 1972
pine forest, North Carolina	1.31±0.07	18.09±0.91	Schlesinger & Lichter, 2001
seagrass bed, Aburatubo Bay	0.87±0.29	27.1±4.1	古田, 2002MS
mangrove forest, Papua New Guinea	1.1-3.0	6-40	Alongi <i>et al.</i> , 1993
mangrove forest, Vietnam	1.55-8.13	19	Alongi <i>et al.</i> , 2000
mangrove forest, Australia	5.8-13.4	35	Alongi <i>et al.</i> , 1998
mangrove forest, Fukido	6.2±2.7	57.3±25.7	this study

表3 堆積物におけるメタン生成速度の比較

Table 3 Comparison of methane productions from sediments of selected wetlands.

study site	CH <sub>4</sub> production rate (μmol·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> )	
salt marsh, North Carolina	9.98	Kelly <i>et al.</i> , 1995
salt marsh, Georgia	143.6	King <i>et al.</i> , 1978
rice paddy, Italy	159.7	Schütz <i>et al.</i> , 1989
rice paddy, China	63.5	Shangguan <i>et al.</i> , 1993
peatland, Minnesota	93.5	Williams & Crawford, 1984
lake Washington, USA	40.8	Kuivila <i>et al.</i> , 1989
lake Mendota, USA	1130	Phelps & Zeikus, 1985
mangrove forest, Florida	18.7	Harris <i>et al.</i> , 1988
mangrove forest, Puerto Rico	18.7	Sotomayor <i>et al.</i> , 1994
mangrove forest, Fukido	118	this study

物中に蓄積される必要がある。本研究では吹通川マングローブ域の堆積物中にC/N比が高い有機物が豊富に存在し、炭素が効率よく蓄積されている可能性を示唆している。

メタン放出と有機物分解

堆積物におけるメタン生成速度は様々な生態系で測定が行われている。これまでの研究例を本研究の結果とともに表3に示す。本研究の値は、メタン生成速度からメタン酸化速度を差し引いたメタン放出速度となっている。

海底堆積物中では硫酸還元菌が、豊富に存在する硫酸塩を利用して活発に有機物分解を行っている。硫酸還元菌はメタン生成菌と同じ基質を利用しメタン生成菌と競合関係にあるため(堀ほか, 1993)、海水が浸入するマングローブ域や塩性湿地では反応の基質となる有機物が豊富でもメタン生成は抑制されている。本研究の値118 μmol·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>も淡水域と比較するとそれほど高い値ではないが、嫌氣的メタン酸化の速度が差し引かれていると考えられるため、この値よりも生成速度は高くなる可能性がある。

本研究での値は吹通川の一測点のみでの結果であり、

また、実験期間が非常に長かったため微生物層が現地と異なっている可能性が高く、現地の環境を正確に反映しているとは言えないが、マングローブ域が潜在的には高いメタン生成能力を持つことを示唆している。

TOCの減少速度は $2.1 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 、メタン放出速度は $118 \mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ であり、メタン放出速度はTOC減少速度の $5.5 \times 10^{-3} \%$ であることがわかる。TOC減少速度がメタン放出速度を大きく上回った理由としては、嫌氣的メタン酸化または、硫酸還元反応、脱窒反応など他の分解過程による有機物分解が考えられる。硫酸塩を多量に含む海底堆積物中では、硫酸還元と共役した嫌氣的メタン酸化が起こることが知られている。本研究の実験では嫌氣的メタン酸化の可能性に加えて、硫酸還元菌、脱窒菌などとメタン生成菌との有機物をめぐり競争も考えられ、大気中のメタンへと移行する有機物が少なくなっていると推測される。

### まとめ

現地観測の結果から、吹通川マングローブ域の堆積物中には、有機炭素量は2.5%~12.2%、有機窒素量は0.04%~0.35%、C/N比は23.8~101.2であり、他の生態系と比較してC/N比が高い有機物が豊富に蓄積され、炭素が効率よく蓄積されていることが判明した。

室内実験においては、有機炭素減少速度が $2.1 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ であったのに対し、メタン放出速度は $118 \mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ であったことから、堆積物中では硫酸還元菌などによるメタン生成の阻害、または嫌氣的メタン酸化が起こっていることが考えられる。室内実験の結果は完全に現地の環境を反映しているとは言えないが、吹通川マングローブ域が他の生態系よりも高いメタン生成能力を持つ可能性が示唆された。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、佐々木眞氏に石垣島の観測で多大なご協力を頂いた。林雅人、篠村理子、山本泰弘、羽川貴弘の各氏には観測中に助言、手助けをして頂いた。ここに深く感謝の意を表す。また、参考資料の収集などを手伝って頂いた石川義朗氏、黒澤勝彦氏、静岡大学理学部地球科学教室鈴木研究室の学生、院生の皆様に重ねて深く感謝し御礼申し上げる。

### 引用文献

- Alongi D. M., Ayukai T., Brunskill G. J., Clough B. F. & Wolanski E. (1998), Sources, sinks, and export of organic carbon through a tropical, semi-enclosed delta (Hinchinbrook Channel, Australia). *Mangroves and Salt Marshes*, **2**, 237-242.
- Alongi D. M., Christoffersen P. & Tirendi F. (1993), The influence of forest type on microbial-nutrient relationships in tropical mangrove sediments. *Journal Experimental Marine Biological Ecology*, **171**, 201-223.
- Alongi D. M., Tirendi F., Trott L. A. & Xuan T. T. (2000), Benthic decomposition rates and pathways in plantations of mangrove *Rhizophora apiculata* in the Mekong Delta, Vietnam. *Marine Ecology Progress Series*, **194**, 87-102.
- Barber T. R., Burke, R. A., & Sackett W. M. (1988), Diffusive flux of methane from warm wetlands. *Global Biogeochemical cycles*, **2**, 411-425.
- 古田朱理 (2002MS), 沿岸域海草藻場における溶存態有機炭素・窒素の動態. 静岡大学理学部卒業論文, 50p.
- Harris R. C., Sebacher D. I., Bartlett D. S. & Crill P. M. (1988), Sources of atmospheric methane in the south Florida environment. *Global Biogeochemical Cycles*, **2**, 231-241.
- 堀 謙三・犬伏和之・松本 聡・和田秀徳, (1993), 水田土壌におけるメタン生成と硫酸還元の水素をめぐり競争の程度. 日本土壤肥科学会雑誌, **64**, 363-367.
- Kelly C. A., Marten C. S. & Ussler W. I. (1995), Methane dynamics across a tidally flooded river-bank margin. *Limnology and Oceanography*, **40**, 1112-1129.
- King G. M. & Wiebe W. J. (1978), Methane release from soils of a Georgia salt marsh. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **42**, 343-348.
- Kuivila K. M., Murray J. W. & Devol A. H. (1989), 水界堆積物におけるメタン生成とその支配因子. 微生物のガス代謝と地球環境(松本 聡編), 学会出版センター, 東京, 101-119.
- Lu C. Y., Wong Y. S., Tam N. F. Y., Ye Y. & Lin P. (1999), Methane flux and production from sediments of a mangrove wetland on Hainan Island, China. *Mangroves and Salt Marshes*, **3**, 41-49.
- 中村武久(1998), マングローブ入門, マングローブ入門—海に生える緑の森(中村武久・中須賀常雄編), 株式会社めこん, 東京, 9-58.
- 日本海洋開発産業協会 (2001), マングローブ群落のCO<sub>2</sub>吸収量と炭素貯蔵量の長期・広域評価手法の検討, プログラム方式二酸化二酸化炭素固定化・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, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京, 220p.
- Phelps T. J. & Zeikus J. G. (1985), 水界堆積物におけるメタン生成とその支配因子. 微生物のガス代謝と地球環境 微生物の生態20 (松本 聡編), 学会出版センター, 東京, 101-122.
- Schlesinger W. H. & Lichter J. (2001), Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*, **411**, 466-469.
- Schütz H., Holzappel-Pschorn A., Rennenberg H., Seiler W. & Conrad R. (1989), A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy. *Journal of Geophysical Research*, **94**, 405-416.
- Shangguan X. J., Wang M. X., Chen D. Z. & Shen R. X. (1993), Methane production in rice paddy fields (in Chinese). *Advance in Earth Science*, **8**, 1-12.
- Sotomayor D., Corredor J. E. & Morell J. M. (1994), Methane flux from mangrove sediments along the southwestern coast of Puerto Rico. *Estuary*, **17**, 140-147.
- 杉村行勇 (1972), 海底堆積物の構成要素. 海洋科学基礎講座12堆積物の化学(三宅泰雄編), 東海大学出版会, 東京, 103p.
- 滝井 進 (1995), 水界堆積物におけるメタン生成とその支配因子. 微生物のガス代謝と地球環境 微生物の生態20 (松本 聡編), 学会出版センター, 東京, 101-122.
- Wang Z. P., Delaune R. D., Masscheleyn P. H. & Patrick W. H. (1993), 土壌中でのメタン生成. 土壌圏

- と大気圏－土壤生態系のカス代謝と地球環境(陽 捷行編), 朝倉書店, 東京, 61-65.
- Watson R. T., Meila Filho L. G., Sanhueza E. & Janetos A. (1992), 生物圏におけるメタンの循環. 土壤圏と大気圏－土壤生態系のカス代謝と地球環境(陽 捷行編), 朝倉書店, 東京, 59-61.
- Williams R. T. & Crawford R. L. (1984), Methane production in Minnesota peatlands. *Applied and Environmental Microbiology*, 47, 1266-1271.
- 八木一行 (1994), 土壤中でのメタン生成. 土壤圏と大気圏－土壤生態系のカス代謝と地球環境(陽 捷行編), 朝倉書店, 東京, 61-65.
- 横田喜一郎 (1996), 底質の採取. 最新の底質分析と化学動態(寒川喜三郎・日色和夫編), 技報堂出版, 東京, 1-25.