

# マングローブ水域の炭素収支に及ぼすガス交換機能の定量化

Evaluation of gas emission effect on the carbon budget in a mangrove estuary.

寺田一美<sup>1</sup>・鯉淵幸生<sup>2</sup>・常田岳志<sup>3</sup>・磯部雅彦<sup>4</sup>

Kazumi TERADA, Yukio KOIBUCHI, Takeshi TOKIDA and Masahiko ISOBE

Nutrient cycling and CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> gas fluxes have been measured over tidal cycles in Fukido mangrove creek. Concentrations of total organic carbon (TOC) in the water increased in fine days and decreased in rainy days. Continuous measurements of gas fluxes showed that the CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from the water were accelerated due to the drop in hydrostatic pressure during the falling tide. The magnitude of total carbon gas fluxes was about ~50% of the carbon accumulation in the creek. Estimation of net carbon cycling in Fukido mangrove estuary including carbon gas emission indicated that the estuary functioned as sinks for carbon.

## 1. はじめに

マングローブは熱帯の河口や沿岸域に群落を作り、独自の貴重な生態系を有するだけでなく、陸地の保全や沿岸の水産生物の産卵・保育場として、周辺海域に対しても極めて重要である。この機能を定量的に評価するために、河道における土砂輸送特性（二瓶, 2006）や、樹木1個体当たりの有機物生産量の測定、クリーク・スオンブ系の3次元流動解析（中辻ら, 1997）など、個々の構成過程の計測が行われてきた。塩性湿地からの懸濁態栄養塩や溶存態栄養塩の輸送に関しては、1970年代頃から様々な研究が行われているが（Valielaら, 1978）、湿地帯が物質収支の中でどのような役割を果たすのか、いまだ意見の分かれるところであり、特に、炭素や窒素などの栄養塩が、湿地帯に滞留するのか、流出するかは、地形や流動特性に大きく依存する（Botoら, 1988）。

一方、温室効果ガスのひとつであるCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>は、湿地帯からの発生量が注目されており、年間の総メタンガス発生量は約575 TgCH<sub>4</sub>（J.T.Houghtonら, 1992）で、湿地からの発生量は地球上の約22%を占めると報告されている。熱帯沿岸に総20万km<sup>2</sup>の面積を持つマングローブ域からのメタンガス発生量は約2.08 Tg/yearと推定されており（Barnesら, 2006）、マングローブ域からガス態として炭素が流出しているのは明らかであるが、それがマングローブ水域のフラックスや、マングローブ樹木からの生産量などと、どのような量的関係にあるのか、

ガス輸送までを含めた物質循環を計測した例はほとんどない。

本研究ではマングローブを1つの系として、水域を通過するフラックスのみならず、ガス輸送までを含めた物質収支を計測することを目的に現地観測および水・ガスサンプルの化学分析を行った。石垣島の吹通川におけるマングローブ域が（図-1）、1つの主な水路だけで外海と結合されている特徴に着目し、ここでの水収支や炭素収支、マングローブ域でのガス収支を統合的に計測することによって、マングローブ生態系全体の炭素収支の定量的評価を行うとともに、それを通じてマングローブ生態系一般における物質収支の測定手法を開発することを目的とした。

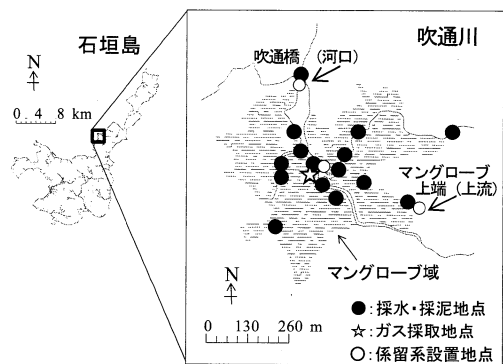


図-1 観測地概要

## 2. 観測概要

### (1) 水・炭素収支測定 概要

沖縄県石垣島北西部に位置する吹通川において現地観測を行った。吹通川集水域では、牧畜やサトウキビ畑、果樹園などの土地利用がなされ、降雨時のマングローブ域クリークへの流入負荷が確認されている（寺田ら、

1 学生会員 修(環) 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻  
2 正 会 員 工博 東京大学講師 新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻  
3 (非会員 農博) 日本学術振興会特別研究員 PD (独法)農業環境技術研究所  
4 フェロー 工博 東京大学教授 新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻

2007). 2006年7月より図-1に示す河口、中流、上流の3地点(図中○印)に自記式水位計、塩分計、DO計、濁度計を設置すると同時に、2006年7月、2007年1月と3、6、8、9月におよそ1週間にわたって、上流と河口での流量測定、栄養塩等のフラックス計測を行い、マングローブ水域内における底質採取・採水も行った。流量測定はKENEK製の電磁流速計(VP2000)ならびにSontek製のFlowTrackerを用いて行い、水位はOnset製U20-001-04-Ti、塩分水温はAlec電子製COMPACT-CTCW、溶存酸素(DO)はCOMPACT-DOW、濁度はCOMPACT-CKUをそれぞれ使用した。採取した底質や水サンプルは採取後すぐに冷蔵保存・空輸し、東京大学の実験室において栄養塩濃度、SS濃度等の分析を行った。アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リン、シリカ濃度はブランルーベ製のAACS-3を用いて、TOC、DOCは島津製作所製のTOC-Vを用いて定量化した。

(2) ガスフラックス測定 概要

2007年9月には上記の水質観測に加え、ガスフラックス計測も行った。マングローブ密生域である図-1☆印で示す地点にて、約12時間にわたり1潮汐間のガスフラックスを測定した。ガス採取はマングローブクリーク水面上に浮かべた浮体式のチャンバーを2台(Chamber1, Chamber2)用い、約1時間ごとにチャンバー内のガスを攪拌・採取し、実験室に持ち帰り、島津製作所製のGC-14Aを用いてメタン、二酸化炭素濃度を分析し、ガスフラックスを計測した。

3. 観測結果

(1) TOCの挙動

2007年1月17日から1月21日にかけて、図-1で示す観測地点にて採取した水サンプルのTOCと塩分の結果を図-2に示す。図-2は採取した地点(図-1)ごとに河口(吹通橋)、上流(マングローブ林の上端地点)、それ以外のマングローブ繁茂域、の3つに分類した結果を、採取日ごとに分類した結果を示す。

この図から、河川上流からのTOC流入量は0.7~5.2 mg/Lで増減し、採取日ごとに見ると、平均0.93 mg/Lの低濃度サンプルは17日に、平均3.3 mg/Lの高濃度サンプルは19日に採取したことが分かった。2007年1月の降水量を見ると(図-3)、1月5日~17日12時頃まで晴天が続いており、17日午後は先行晴天日数が12日間と長かった。これらの低濃度サンプルは17日の降雨直前に採取したものであった。従って河川上流からのTOC流入量は、平水時は0.7~1.2 mg/Lで安定するものの、出水時には2.2~5.2 mg/Lと増加し、上流後背地には農地・牧畜地が分布することから(寺田ら, 2007)、降雨に伴う増水で集水域からの有機物流出が発生しているのではないかと

と思われた。

一方、マングローブ域と河口でのTOCは11.2~15.5 mg/Lの高濃度帯と、1.8~4.9 mg/Lの低濃度帯に二極化した。高濃度の結果は、河口、マングローブ域どちらの結果も17日(図中菱形)の下げ潮時に採取したものであった。また17日に採取したサンプルで低濃度を示した3点(河口1点、マングローブ域2点)は、ファーストフラッシュ直後のものであった。上流からの流入量は晴天時には約1 mg/Lと低い値を示すことから、TOCは降雨時には希釈され上流からの流入濃度とほぼ同等の低濃度になるが、晴天時にはマングローブ域で増加する可能性が示唆された。

Robertsonら(1992)は、オーストラリアのミッションリー湾での調査で、マングローブ樹木帯からクリークへのリター量は2738 kgC/ha/year、表層土壌からクリークへのPOC流出量は584 kgC/ha/yearと報告しており、マングローブ樹木帯からクリークへの炭素流出量はかなり大きいと考えられる。吹通川マングローブ域でも同様に、リターフォールや有機物を大量に含んだ土壌からの炭素流出など、マングローブ樹木帯からクリークへの炭素供給が盛んであることが予想される。従って、晴天時には上流からの流入TOC濃度が低いにも関わらず、マングローブ域や河口域で高濃度のTOCが検出されたと考えられた。一方降雨時には、上流からマングローブ域へ流入するTOC量は約3.5倍に増えるが、河口域やマングローブ域でのTOC濃度は3mg/L前後に安定していることから、降雨によって希釈効果が増進されたと考えられた。これらの結果から、マングローブ域での炭素収支には、マングローブ樹林からの有機物供給や、炭素を豊富に蓄えた土壌からの溶出など、マングローブ生態系そのものからの寄与が重要であることが示唆された。

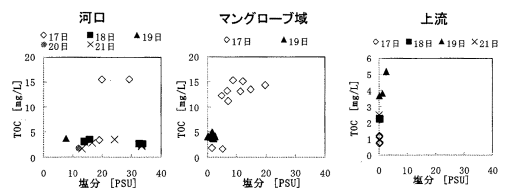


図-2 TOCと塩分の関係

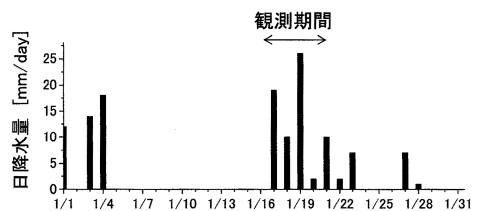


図-3 2007年1月の降水量

(2) 炭素収支

TOC, POC などの一連の水質分析結果から, マングローブ域クリーク内の炭素収支を算定した. その結果を表-1に示す. 以下における物質収支は, マングローブ域を中心として, 上げ潮方向を負, 下げ潮方向を正とした.

表-1 マングローブ域を中心とした炭素収支 (2007年1月, 下げ潮方向がプラス)

日	降水量 mm/day	河口フラックス		上流フラックス kgC/day
		上げ潮 kgC/day	下げ潮 kgC/day	
18日	14	-941	894	235
19日	21	-916	896	194
20日	9	-1077	1153	138
21日	3	-1175	1118	155

潮汐による輸送量は日によって変化し894~1175 kgC/dayと大きい, 一潮汐間の正味の輸送フラックスは, 20~60 kgC/dayであった. また上流からの流入量は138~235 kgC/dayで, それらの結果から換算すると, マングローブ水域に滞留する炭素量は, 約200 kgC/dayで, 観測ごとのばらつきは小さい.

この炭素滞留量約200 kgC/dayは, マングローブ生態系全体で捉えると, マングローブ樹林そのものの生産量約530 kgC/day (Robertson ら (1992) より吹通川マングローブ域13ha (中須賀ら, 1974) へ面積換算) に対して約38%を占め, クリークへのリター供給量98 kgC/day (Robertson ら (1992) を面積換算) に対しては約204%となり, マングローブ生態系における炭素収支に対し, クリーク水中の炭素滞留量が重要な位置づけであることが明らかになった.

(3) 炭素ガスフラックス

炭素滞留量がこのように大きいと, マングローブ域は埋没し長期間存続出来ないはずである. そこで2007年9月に炭素放出に関連するガスフラックスの測定を行った. メタン, 二酸化炭素ガスフラックスと水位の結果を図-4に示す. 観測は約20m離れた2地点で2つのチャンバー (Chamber1, Chamber2) を用いて行った.

メタンフラックスは下げ潮時に, 約0.57~1.7mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/hourのピークを持ち, それ以外は約0.2~0.3mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/hourとほぼ一定量で発生していた. また, 二酸化炭素も同様に下げ潮時に最も多く発生し, その最大値は494 mgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/hourであった. ガスフラックスはメタン・二酸化炭素のどちらも下げ潮時に増加する傾向を示した. これまでも, さまざまな状況下でのマングローブ水域から発生するメタンガス量を測定した研究例があり, 都市化した後背地を持つマングローブ水域や, 家庭排水の流入があるマングローブ水域では, メタン発生量が最大13.04 mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/hourと, 比較的多くなるという報告がある (Purvaja and Ramesh, 2001).

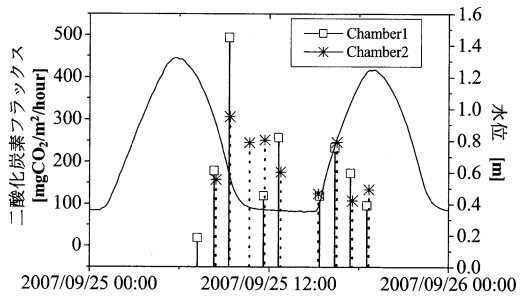
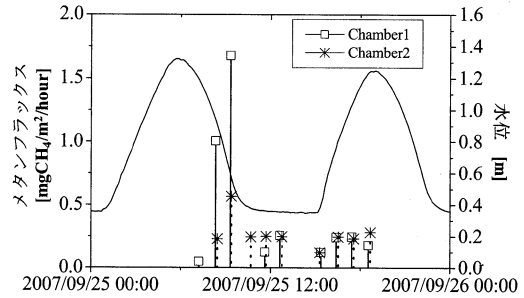


図-4 ガスフラックスと水位

一方で, 家庭排水の流入がない原生林においても, その値は0~8.34mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/hour (Barnes ら, 2006) と, メタンガス測定値は地域によって大きなばらつきがある. 本研究での結果は都市化や家庭排水の影響があるマングローブ水域と, それらの影響がない自然林とのちょうど中間値を示しており, サトウキビ畑や牧草地を後背地を持つ吹通川の現況を反映していると考えられる.

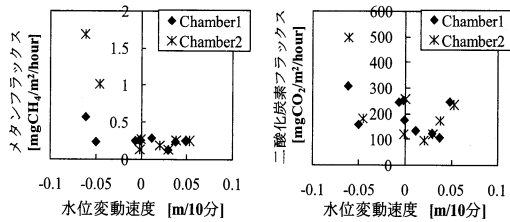


図-5 ガスフラックスと水位変動速度

メタンも二酸化炭素も同様に, 下げ潮時にガスフラックスが増加していた. その傾向を明らかにするため, ガスフラックスと観測地点の水位変動速度との関係を図-5に示す. この結果からも, 明らかに下げ潮最大時にガスフラックスが大きくなり, その値は水位変動速度と負の相関を持つことが示唆された.

メタン・二酸化炭素ガスの発生は, マングローブ樹林で生産された有機物が, 滞留・蓄積し, 嫌気土壤中で分解, メタン発酵されたものが土壌中に蓄積され, それが恒常的, もしくは何か物理的環境因子が引き金となって発生しているものと考えられる. メタン生成過程には,

土壌の種類, 温度, 有機物量, 酸化還元電位, Fe および Mn 含量, 塩類濃度などが変動要因として考えられてきた. マングローブ土壌中は嫌氣的な状況が多く, 吹通川マングローブ帯でこれまでに行った調査の結果, 土壌中に含まれるメタン濃度は16 ppm, 二酸化炭素濃度は1302 ppm と, 大気中濃度(メタン:1.8 ppm, 二酸化炭素:380 ppm)と比較して, メタンは8.9倍, 二酸化炭素は4倍近く高濃度のガスが貯留されていることが分かっている. 従って, 土壌中にトラップされているメタンや二酸化炭素が, 潮位変動に伴う物理環境変動によって, その発生タイミングに影響を受けているのではないかと考えられた.

(4) 気体変動シミュレーション

ガス発生が下げ潮時に増加する要因を明らかにするため, 土壌中の気体体積変動を組み込んだモデルを開発し検討を行った. 土壌中でのガスは, 気体(気相)もしくは液体に溶けた形(液相)で存在する. 圧力や温度などの物理環境が変動すると, ガスの溶解度が変化し, 気相のガス体積が増え, 浮上し, 大気中に発生すると考えられる. ここでは潮汐による静水圧変動が起こった際, 土壌中での気相, 液相に含まれるガス体積がどう変動するか, シミュレーションにより検討した. 液相での溶存ガスは圧力変動に対し, 気相ガスと迅速に気液平衡が成り立つと仮定し, 各相でのガス体積と圧力との関係は下記のように表せる. (Tokida ら, 2007; Fechner-Levy and Hemond, 1996)

$$P_i V_g = n_{g,i} RT \quad (1)$$

$$\frac{P_i}{H_i} V_w = n_{w,i} RT \quad (2)$$

$P_i$ : ガス種  $i$  の分圧 Pa,  $V_g$ : 気相体積%,  $n_{g,i}$ : 気相ガスモル数 mol,  $H_i$ : ガス種  $i$  の無次元ヘンリー定数,  $V_w$ : 液相体積%,  $n_{w,i}$ : 液相ガスモル数 mol. ここで, 系外とのガスのやり取りがないと仮定すると, 気相と液相ガスの総物質量は保存し(式(3)), その微分から圧力変化に対する気体体積変化を計算できる(式(4)).

$$\frac{P_i V_g}{RT} + \frac{P_i V_w}{H_i RT} = const. \quad (3)$$

$$\frac{dV_g}{dP_i} = -\frac{V_g}{P_i} - \frac{V_w}{H_i P_i} \quad (4)$$

初期状態として, 土壌中のガス体積率  $V_g$  を10% (Fechner-Levy and Hemond, 1996; Tokida ら, 2007) と仮定し, 吹通川での表層土壌の平均含水率から  $V_w$  を75%としてそこからの変動を計算した. 図-6に計算結果を

示す. 土壌中の気体体積は圧力と反比例する形で増減し, 観測結果(図-5)と同様に下げ潮最大時に大きくなることから分かる. これは潮汐変動による静水圧変化が, マングローブ水域からのガス発生機構に大きな影響を与えることを示唆している.

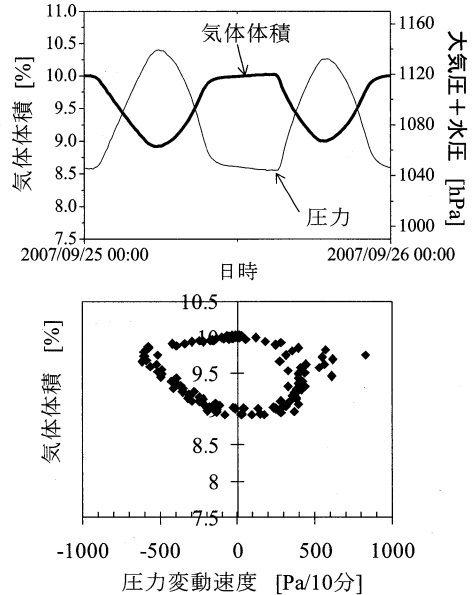


図-6 土壌中の気体体積変化の計算結果

(5) ガス輸送を含めた炭素収支

メタン・二酸化炭素ガス発生量と水位変動速度との相関式 ( $R^2=0.982$ ) から, 1日の総炭素ガス発生量を推定し, 炭素ガス発生量に大きな季節変化はないと仮定し, 2007年1月の水域の炭素収支と併せて検討した. その結果を図-7に示す. ここで林床からのフラックスもクリークと同様と仮定し, マングローブ生態系13ha (中須賀ら, 1974) 全体からの総炭素ガス発生量を推定した結果, 約116 kgC/day となった. これはマングローブ水域への炭素滞留量200 kgC/dayの50%に達し, マングローブ生態系の炭素収支において炭素ガス発生への寄与が極めて大きいことが明らかになった. また, マングローブ滞留量の約10~30%が, 潮汐などの流動に伴って流入出し, その値は晴天時と降雨時とで約3倍の差があることが明らかになった. 一方, マングローブ樹林の総一次生産量は528 kgC/day (Robertson, 1992より面積換算, 日平均)と報告されており, これを吹通川マングローブ生態系の炭素循環と比較すると, 1日の炭素ガス発生量の4.6倍, 上流からの流入量(晴天時)の3.4倍に相当し, マングローブ樹林による炭素固定も炭素循環において大きな影響を及ぼすことが分かった. 水中の炭素輸送を見ると, 上流からの流入に加え, 潮汐による微量な流入があり, 総じて約200 kgC/day クリーク中に滞留, 堆積する. と

ころが炭素ガスとして系外流出する量が、滞留量の約54%となり、樹木一次生産によって固定される量が約260%もの量を占めるため、最終的に吹通川マングローブ生態系は、大量の炭素貯留庫として機能していることが明らかになった。

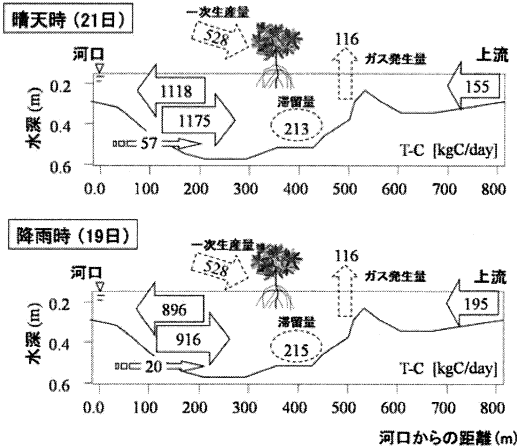


図-7 吹通川マングローブ域における炭素収支

#### 4. まとめ

本研究では、沖縄県石垣島吹通川マングローブ生態系での長期現地観測を通して、水フラックスのみならず、ガス輸送までを含めた総合的な炭素収支の計測を行った結果、下記が明らかとなった。

- 吹通川マングローブ域での TOC 濃度は、晴天時にはマングローブ樹林からのリター供給や、有機物を大量に含んだ土壌からの炭素流出によって、マングローブ域で増加し、降雨時には希釈される。
  - 潮汐による水位変化はガス放出のタイミングに大きく寄与し、静水圧の急減によってガス放出が増大する。
  - ガスとして放出される炭素の総量はマングローブ域の滞留炭素量の50%に達し、今後は炭素ガス収支の計測を蓄積することが、マングローブ生態系の物質収支を解明する上で重要であり、これらの比較は水域の機能を理解するのに有効と考えられる。
  - 水中の炭素輸送の結果より、クリーク中には約200 kgC/day 滞留することが明らかになった。またマングローブ生態系全体で捉えると、炭素ガスの系外流出量は滞留量の約54%、樹木一次生産による固定量は約260%と概算され、最終的にマングローブ生態系は炭素貯留庫として機能する。ただしここでは樹木種の違いや呼吸量、林床からのフラックスは考慮しておらず、今後の課題である。
- マングローブ生態系にはシオマネキやトビハゼなどに

代表される様々な生物が生息しており、有機物の貯留庫であるという、本研究で明らかになった吹通川マングローブ域の性質は、これらの豊かな生態系形成の基盤となっていると考えられる。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費（課題番号：19686032，研究代表者：鯉淵幸生），（財）河川環境管理財団の河川整備基金助成事業，および（財）アサヒビール学術振興財団からの研究助成により実施致しました。ここに謝意を表します。また、吹通川の現地観測において、シーカヤックツーリング&ネイチャーウォッチングめがろば代表の兼村憲次氏に大変お世話になりました。ここに深謝します。

#### 参考文献

- 寺田一美・鯉淵幸生・磯部雅彦 (2007)：現地観測に基づく潮汐卓越型マングローブ域における物質収支，海岸工学論文集，54，pp. 1056-1060.
- 中須賀常雄・大山保表・春木雅寛 (1974)：マングローブに関する研究 I. 日本におけるマングローブの分布，Japanese Journal of Ecology, Vol.24, No.4, pp.237-246.
- 中辻啓二・大家敬之・J.E.Ong・W.K.Gong (1997)：マングローブ水域におけるクリーク・スオンプ系の3次元流動の数値モデル化，海岸工学論文集，44，pp. 1156-1159.
- 二瓶泰雄 (2006)：宮良川マングローブ水域における土砂輸送特性に関する長期連続モニタリング，海岸工学論文集，53，pp. 1086-1090.
- Barnes, J., R. Ramesh, R. Purvaja, A. Nirmal Rajkumar, B. Senthil Kumar, K. Krithika, K. Ravichandran, G. Uher, and R. Upstill-Goddard (2006)：Tidal dynamics and rainfall control N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from a pristine mangrove creek, Geophysical Research Letters, vol. 33, L15405, doi:10.1029/2006GL026829.
- Boto, K. G., J. T. Wellington (1988)：Seasonal variations in concentrations and fluxes of dissolved organic and inorganic materials in a tropical, tidally-dominated, mangrove waterway, Marine Ecology Progress Series, vol.50：pp. 151-160.
- Fechner-Levy, E. J., and H. F. Hemond (1996)：Trapped methane volume and potential effects on methane ebullition in a northern peatland, Limnol. Oceanogr., 41, pp. 1375-1383.
- Houghton, J.T., B.A.Callander and S.K.Varney, eds. (1992)："Climate change1992", The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment, pp.25-46, Cambridge University Press.
- Purvaja R., R. Ramesh (2001)：Natural and anthropogenic methane emission from coastal wetlands of South India. Environmental Management, 27, pp. 547-557.
- Robertson, A. I. and D. M. Alongi (eds.) (1992)：Tropical mangrove ecosystems, Coastal and estuarine series；41, AGU.
- Tokida, T., T. Miyazaki, M. Mizoguchi, O. Nagata, F. Takakai, A. Kagemoto, and R. Hatano (2007)：Falling atmospheric pressure as a trigger for methane ebullition from peatland, Global Biogeochemical Cycles, vol. 21, GB2003, doi: 10.1029/2006GB002790.
- Valiela, I., J. Teal, S. Volkman, D., Shafer, E. J. Carpenter (1978)：Nutrient and particulate fluxes in a salt marsh ecosystem：tidal exchanges and inputs by precipitation and groundwater, Limnol. Oceanogr. 23, pp. 798-812.