

マングローブ海域の炭素動態

—マングローブ海域からの二酸化炭素の吸収・放出—

池田 穰

沖縄県石垣島、タイ、ベトナムのマングローブ生態系での炭素動態に関する調査を2000年から2003年にかけて行った。マングローブ生態系は、陸域と海域に分けられる。陸域は植物であるマングローブの光合成により炭素のシンクとして機能する。しかし海域は植物プランクトンも少なく、有機物が分解されていると考えられる。ここでは沖縄県石垣島、タイ、ベトナムのマングローブ海域において、マングローブの葉および水中有機物の分解速度を調べるとともに、マングローブ海域と大気との二酸化炭素交換量、マングローブ水塊の呼吸商をもとめた。

キーワード：マングローブ海域，葉，水中有機物，二酸化炭素交換量，呼吸商

1. はじめに

マングローブは、熱帯・亜熱帯沿岸海域にサンゴ礁と同様に広がる生態系である。近年、特に東南アジアにおいて、エビの養殖池造成などの乱開発のため減少している。マングローブは、天然の防波堤、漁礁として機能し、生物資源の宝庫、景観価値を持ち、近年の地球温暖化にからむ二酸化炭素の貯蔵源ともなっている。マングローブ生態系は熱帯雨林に匹敵する高い生産性があり、そのため二酸化炭素削減のために途上国と先進国とが共同実施するクリーン開発メカニズム（CDM）による排出権取引の対称となる可能性もある。こうしたマングローブ生態系は、図-1のように陸域と海域に別れ、その炭素動態は複雑であり、解明されていない部分も多い。ここでは、マングローブ海域を対象として、マングローブの葉および水中有機物の分解速度を調べるとともにマングローブ海域と大気との二酸化炭素交換量、マングローブ水塊の呼吸商をもとめた。

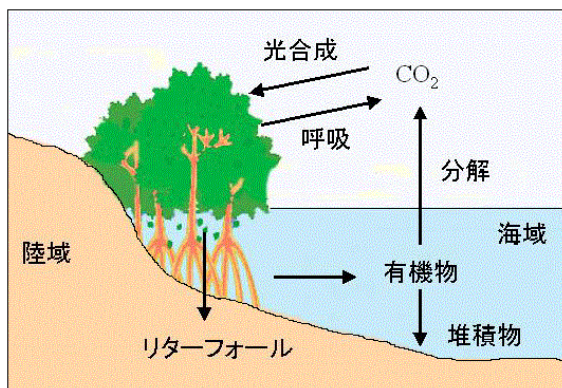


図-1 マングローブ生態系の炭素動態

2. 調査方法

2.1 調査場所

沖縄県石垣島吹通川、タイ王国のトラート市郊外およびベトナム社会主義共和国のタンホア市郊外のそれぞれのマングローブ海域で調査を行った（図-2）。

2.2 調査方法

(1) 葉の分解速度

石垣島のマングローブのヤエヤマヒルギ (*Rhizophora stylosa*) のフレッシュな葉を一辺2cmの正方形にカットした。それら葉片をメッシュ2mmのリターバックに入れ、マングローブの木にリターバックをひもで結び付けた。バックは土壌に接し、満潮時には完全に冠水するように90日間設置した。その間0, 30, 60, 90日目にそれぞれ一部葉片を採取した。採取した葉片は、110°Cで一昼夜乾燥させた後、乾燥重量を測定し、次に乳鉢で砕き粉末にした後、C/Nコーダー（NC-800, Sumigraph）でC、N量を測定した。

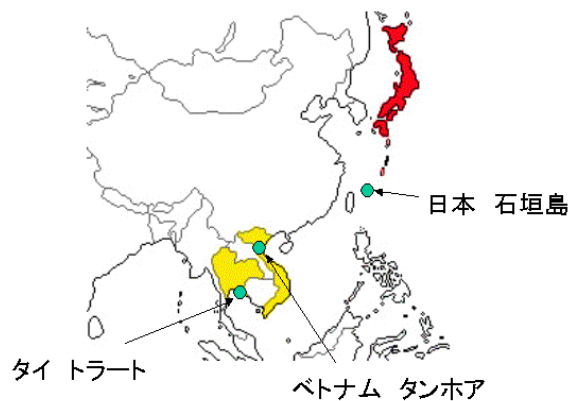


図-2 調査場所

* 環境事業開発部

(2) 水中有機物の分解速度

タイのトラート市郊外のマングローブ海域において10Lの水をポリカーボネイト製の容器に採取した。そこに生物活動を抑えるためアジ化ナトリウム (NaN_3) を25 mmol/l 添加した (Knauer et al. 1984¹⁾)。容器上部に空気層を残し、25度の一定温度で4ヶ月ほど保存した。その間適宜、容器の下部に取り付けた蛇口よりシリコンチューブで採水しTOC (全有機態炭素濃度) や栄養塩濃度を調べた。

TOC測定のためのサンプルビンには、各採水時30mlの茶褐色のガラス製のビン2つとした。それらビンは、ガラスに付着した有機物を除くために事前に450℃で4時間ほど焼いた。それぞれのビンには採水時に海水を25ml入れ、テフロン性のシールで口を覆った上にプラスチック製のスキューラキャップで蓋をした。それらを凍結保存し、自然解凍させた後、高温接触酸化法による分析装置 (TOC-5000, 島津製作所) でTOCを測定した。この分析装置の分析値の変動係数の平均はおよそ2%であった。

栄養塩濃度の測定のためには、50mlのプラスチック製の容器に海水を入れ凍結保存した。自然解凍後の分析には自動分析装置 (Traacs-800, ブランリュベ社) を用いた。DIN (全無機態窒素濃度=アンモニア態窒素濃度+亜硝酸態窒素濃度+硝酸態窒素濃度)、リン酸態リン (PO_4^{3-}) 濃度を各サンプルについて測定した。また有機態成分も含めた栄養塩濃度をみるために、ケルダール分解により有機態の窒素およびリンをそれぞれ無機態に分解した上でTON (全有機態窒素濃度) およびTOP (全有機態リン濃度) をもとめた。リンの測定精度は0.01-0.02 $\mu\text{mol/l}$ 、窒素の測定精度は、0.1 $\mu\text{mol/l}$ であった。



写真-1 石垣島のマングローブ



写真-2 タイ トラートのマングローブ (乾季)

(3) 大気・海洋間の二酸化炭素交換量

ベトナムのタンホア市郊外およびタイのトラート市郊外それぞれのマングローブ海域において表層の水温、塩分、pHおよび全炭酸を測定した。さらに水中の二酸化炭素分圧を水温、塩分、pHおよび全炭酸の値から炭酸平衡計算により算出した。また平均風速、二酸化炭素の溶解度および大気と海洋の二酸化炭素分圧差から大気・海洋間の二酸化炭素交換量をもとめた。

水温、塩分、pHおよび全炭酸 (TC) は、表層の値とした。水温は水銀温度計、塩分は、塩分計 (SAL-1, 島津製作所)、pHはpHメーター (MP120, メトラー)、全炭酸は非分散型赤外線分光光度計 (TOC-5000, 島津製作所) でそれぞれ測定した。水温、塩分、pHは現場にて測定した。全炭酸分析用のサンプル水は、プラスチックシリンジ (50ml) にフィルター (DISMIC 0.45 μm , アドバンテック) を取り付け、ろ過した後50mlの褐色ガラスビンに入れた。さらに生物代謝による全炭酸の変動を避けるため、アジ化ナトリウムを濃度25mmol/lになるように滴下後、冷蔵保存した。この冷蔵保存したサンプルを日本に持ち帰り、上述した非分散型赤外線分光光度計で測定した。



写真-3 ベトナム タンホアのマングローブ (乾季)

水中の二酸化炭素分圧は、測定された水温、塩分、pH および全炭酸の値から、インターネットのフリーウェアとして提供されているCO2SYS.EXEプログラム (<http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/co2rprt.html>) を用いて算出した。このプログラムは、Ernie LewisとDoug Wallaceが作成したもので、複雑な炭酸平衡計算のデファクトスタンダードとして広く用いられている。炭酸平衡計算に必要な各種係数は、Roy et al. (1993)²⁾ およびDickson (1990)³⁾ を用いた。またpHはNBSスケールである。

(4) 水塊の呼吸商

水塊の生物による呼吸商 ($[CO_2]/[O_2]$) をもとめるためには、二酸化炭素濃度に加えて酸素濃度が必要である。酸素濃度は、多項目水質計 (MWQ-III, 三洋測器社) を用いて測定した。これは水温、塩分、溶存酸素濃度および水深を連続的に測定する装置である。

3. 結果と考察

3.1 葉の分解速度

図-3に葉片の単位乾燥重量あたりの炭素・窒素当量およびC/N比の経時変化を示す。90日間に炭素は40 mmolC/gから半減したが、窒素は大きくは変わらなかった。C/N比は60から11へ減少した。一般にC/N比は、10前後で腐食質になるといわれており、一ヶ月で腐食したと考えられる。葉の分解の半減期に関しては、約60日との報告がある一方、最初の70日間に炭素は減少するものの、窒素は増加したとする報告もある。また窒素が減少する場合もあり、葉の有機物の分解の機構に関しては未解明の部分が多い。

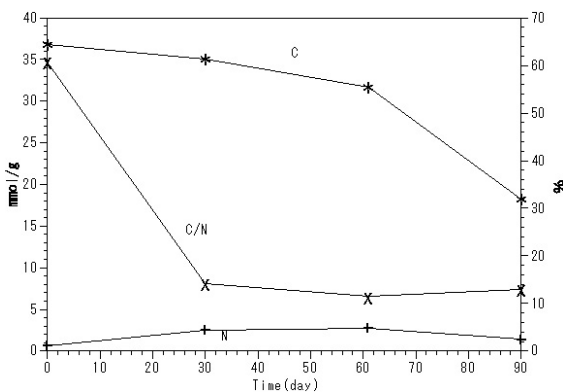


図-3 ヤエヤマヒルギ (*Rhizophora stylosa*) の単位乾燥重量あたりの炭素・窒素当量およびC/N比の経時変化

3.2 水中有機物の分解速度

図-4、図-5、図-6、図-7にそれぞれ、TOC、DINとTON、各態窒素濃度 (アンモニア態窒素濃度、亜硝酸態窒素濃度、硝酸態窒素濃度) およびリン酸態リン濃度とTOPの経時変化をそれぞれ示す。TOCは、5日間で260 μ molC/Lから145 μ molC/Lに急激に減少した。DINはスタートから20日後にかけて濃度が上昇し、その後、一定に推移したものの、TONは当初の濃度を中心に周期的な変動を示した。各態窒素濃度は、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素濃度の順に濃度のピークが現れた。ピーク後、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素は濃度が減少していくものの、硝酸態窒素濃度はピーク値を保った。またTOPは減少しほぼゼロになるものの、リン酸態リン (PO_4^{3-}) 濃度は漸増した。

TOCが、5日間で260 μ molC/Lから145 μ molC/Lに急激に減少したことから、TOCの減少速度は、23 μ molC/L/dayとなる。平均水深1mを仮定するとその分解速度は、1.01tC/ha/yearと換算された。一方、宮古島のサンゴ礁海水中の有機物分解の場合もTOCは、今回と同様指数関数的に減少し、その分解速度は、0.88 tC/ha/yearであり今回のそれと同等の大きさであった (Ikeda et al., 2003)⁴⁾。また初期の全有機態炭素に占める易分解性有機態炭素の割合は、およそ4割ほどであった。

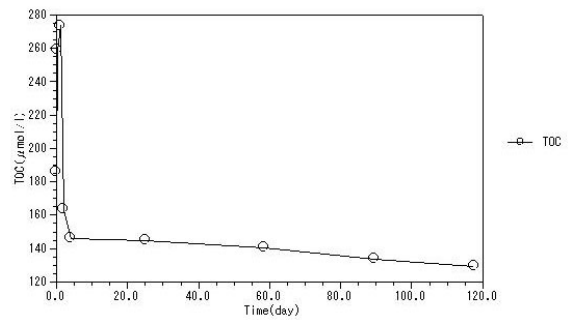


図-4 TOCの経時変化

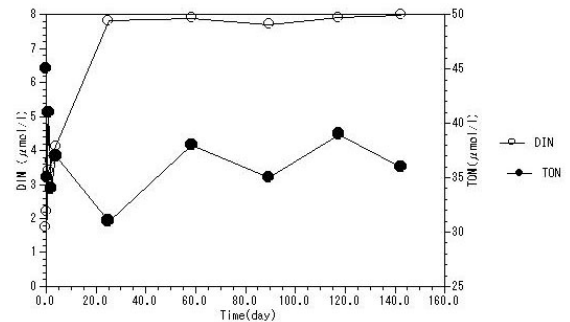


図-5 DIN, TONの経時変化

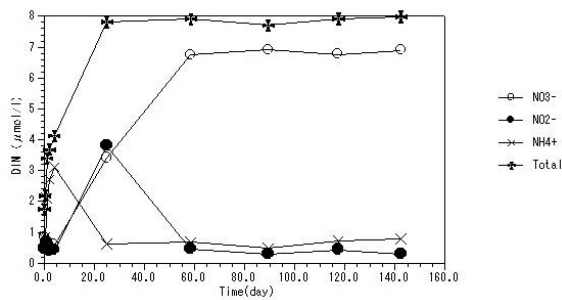


図-6 各態窒素濃度の経時変化

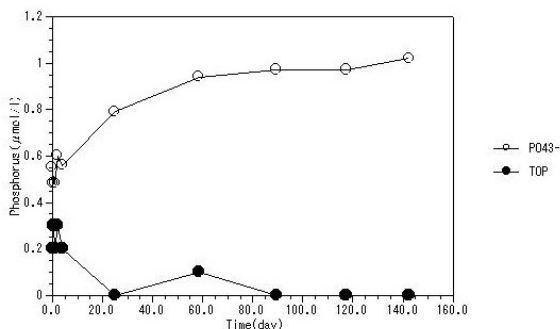


図-7 リン酸態リン (PO₄³⁻) とTOP濃度の経時変化

栄養塩濃度の経時変化では無機態成分であるDINやリン酸態リン濃度は、増加していくものの、TOPは減少していき、TONも変動があるものの当初の濃度からは増加しない。このことは、有機物の分解に伴い、栄養塩についても有機態成分が無機態成分に転換していることを示唆している。特に無機態窒素を構成する各態窒素（アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素）の濃度の経時変化をみると、各濃度のピークのずれから、はじめに分解に伴い発生したアンモニア態窒素が亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の順に変遷していくことがうかがえる。

3.3 大気・海洋間の二酸化炭素交換量

ベトナムのタンホア市郊外のマングローブ海域において水温は29-33℃の範囲で、塩分は、沿岸ではほとんど0であった。沿岸から離れた地点でも最高10.4‰で、通常の海水の値である34‰とは程遠くほぼ淡水と考えられた。pHは、7.72から8.23の範囲にあり、沿岸から遠いほど高くなる傾向がみられたものの、通常の海水の値である8.2よりは一点を除き、小さかった。水中の二酸化炭素分圧の分布は図-8に示される。648 μatmから1535 μatmの範囲であった。塩分やpHからみると調査地点は、海水の影響がほとんどない淡水であると考えられた。

一方、タイのトラート市郊外のマングローブ海域において水温は、29-31℃の範囲、塩分は、8.6-29.8‰の範囲であった。河口から離れるに従い塩分が増加し海水の

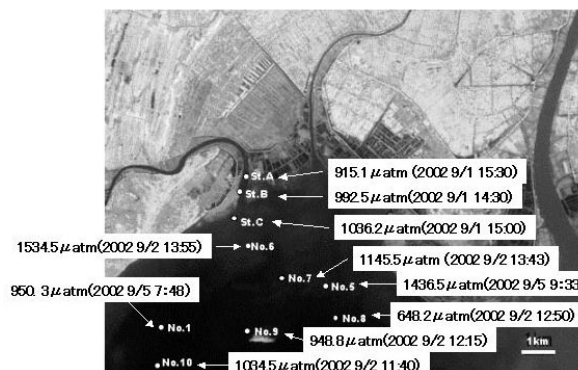


図-8 ベトナムのタンホア市郊外のマングローブ海域の水中の二酸化炭素分圧

それに近づく傾向がみられた。現場測定時の温度におけるpHは、7.04から8.11の範囲にあった。pHは河口から離れるに従い、海水のpHである8.2に近づく傾向がみられた。

また水中の二酸化炭素分圧の分布は図-9に示される。453 μatmから2847 μatmの範囲であった。大気中の二酸化炭素の分圧は、375 μatm付近であり、外洋においては、ほぼ大気中と海水中の二酸化炭素分圧は平衡状態にあると考えられた。河口から外洋に向かって水中の二酸化炭素分圧は減少し、大気と平衡に達している外洋の値に近づく傾向にあった。塩分、pHおよび水中の二酸化炭素分圧の分布は、いずれも河口から外洋に向かうに従い、海水の影響が大きくなることを示していた。

ベトナム、タイいずれのマングローブ海域においても河口付近の水中の二酸化炭素分圧は大気中の二酸化炭素分圧375 μatmを大幅に越えており、これらの地帯が二酸化炭素のソースであることを示している。

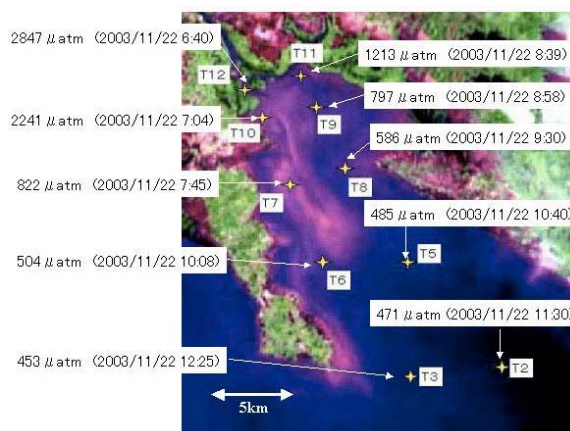


図-9 タイのトラート市郊外のマングローブ海域の水中の二酸化炭素分圧

他の沿岸域では、アマゾンの湿地帯河口における年間を通しての水中の二酸化炭素分圧の平均が、 $4350 \pm 1900 \mu\text{atm}$ と報告されている (Richey et al., 2002)⁵⁾。この場合、 $1.2 \pm 0.3 \text{MgC/ha/year}$ の二酸化炭素が放出されていると見積もられている。またヨーロッパの26の湿地帯河口での水中の二酸化炭素分圧は、平均 $536 - 4148 \mu\text{atm}$ と報告されている (Frankignoulle et al., 1998)⁶⁾。大気中の二酸化炭素分圧がおよそ $375 \mu\text{atm}$ であることから、本調査地点を含むこれら湿地帯河域は、二酸化炭素のソースであることが示唆される。

一方、藻類が繁茂し、富栄養化状態にある沿岸域や貧栄養ながらサンゴ等の共生藻により活発な光合成が行われているサンゴ礁では、昼間には水中の二酸化炭素分圧が、大気中の二酸化炭素分圧より小さくなることもあり、全体として二酸化炭素のシンクとなる場合もある (Ikeda, 1997⁷⁾)。

マングローブ海域は、図-1に示すように底質部分と水塊部分に分けられる。底質部分は、リターフォールなどの有機物が堆積する場であるとともに、それら有機物の一部が分解する場である。一方、水塊部分は、植物プランクトンも少なく、分解が卓越している。マングローブ海域において水中の二酸化炭素分圧が大気中のそれより大きいことは、これらの要因を反映していると考えられる。

次にマングローブ海域でどのくらいの二酸化炭素が放出されているかを以下のLiss and Merlivat (1986)⁸⁾の式から推算する。

$$F = k \times S \times \Delta p\text{CO}_2$$

ここで

F: 二酸化炭素の交換量 $\text{mol/m}^2/\text{h}$

k: 輸送速度 (風速の関数) m/h

S: 表面海水における二酸化炭素の溶解度 $\text{mol/m}^3/\text{atm}$

$\Delta p\text{CO}_2$: 大気と表面海水中の二酸化炭素の分圧差 atm

タイのトラート市郊外の現地での測定した平均風速はほぼ無風である 0.2m/s であった。従って風速の関数である輸送速度kは u (風速) $= 0.2 \text{m/s}$ ($< 3.6 \text{m/s}$) であるので

$$k = 0.17u (\text{m/s}) = 0.17 \times 0.2 (\text{m/s}) = 122 (\text{m/h})$$

となる。また水温 30°C での表面海水または水における二酸化炭素の溶解度Sをおよそ $31 (\text{mol/m}^3 / \text{atm})$ 、水中と大気中の二酸化炭素分圧の差を

$$\Delta p\text{CO}_2 = 2700 - 375 = 2325 (\mu\text{atm})$$

とすると交換量は、

$$\begin{aligned} F &= 122 (\text{m/h}) \times 31 (\text{mol/m}^3 / \text{atm}) \times 2325 \times 10^{-6} (\text{atm}) \\ &= 8.79 (\text{mol/m}^2/\text{h}) \\ &= 9.24 \text{ k ton/ha/year} \end{aligned}$$

となる。同様にしてベトナムのタンホア市郊外のマングローブ海域での大気・海洋間の二酸化炭素交換量を概算する。この場合平均風速を 2m/s 、大気・海洋間の二酸化炭素分圧の差を

$$\Delta p\text{CO}_2 = 1000 - 375 = 625 (\mu\text{atm})$$

とすると、交換量は

$$\begin{aligned} F &= 1224 (\text{m/h}) \times 31 (\text{mol/m}^3 / \text{atm}) \times 625 \times 10^{-6} (\text{atm}) \\ &= 23.72 (\text{mol/m}^2/\text{h}) \\ &= 24.9 \text{ k ton/ha/year} \end{aligned}$$

となる。

3.4 水塊の呼吸商

水中の二酸化炭素分圧 ($p\text{CO}_2$) とその測定時に対応する溶存酸素濃度を単位を揃えてグラフにプロットするとベトナム、タイそれぞれのマングローブ海域において図-10, 11のようになる。これらを直線回帰した場合のそれぞれの直線の傾き 0.72 , 0.55 は、呼吸商 $= [\text{CO}_2]/[\text{O}_2]$ を示すと考えられる。独立栄養生物の光合成による有機

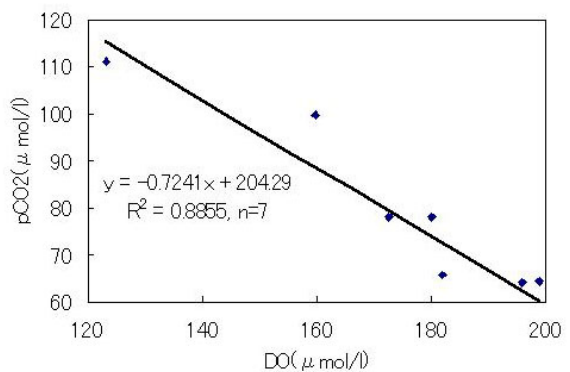


図-10 ベトナムのタンホア市郊外のマングローブ海域の二酸化炭素分圧 ($p\text{CO}_2$) と溶存酸素濃度 (DO) との関係

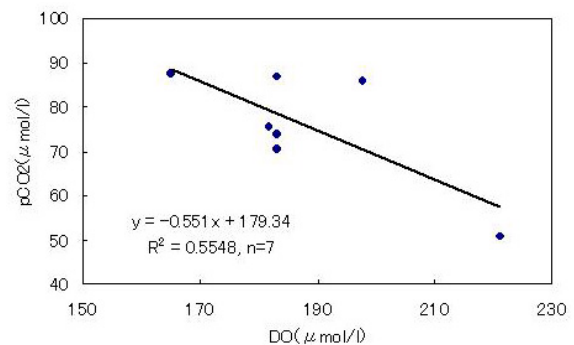
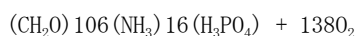
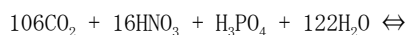


図-11 タイのトラート市郊外のマングローブ海域の二酸化炭素分圧 ($p\text{CO}_2$) と溶存酸素濃度 (DO) との関係

物生産と従属栄養生物による有機物分解に関する以下のレッドフィールドの理論式 (Redfield, 1958⁹⁾) では呼吸商は, $106/138=0.77$ となる。



理論式から導かれる値と実測値から求められた値とがほぼ一致していることが確かめられた。

4. おわりに

マングローブ海域では有機物の分解が卓越しているものの、その有機物はマングローブ生態系以外の場所由来する部分も多い。そのためマングローブ生態系全体を二酸化炭素のソースと一概に断じることとはできないと考えられる。またマングローブ生態系はその複雑な地形により波が緩和され、沿岸の防波堤として機能している。さらに多くの生物種の生存場所を提供し、生物多様性の保全に資している。沿岸の開発等の人為的な影響により荒廃しつつあるマングローブ生態系を植林により再生していくことは、このような観点からも必要なことと思われる。

謝辞: 本調査は、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 (現 (財) エンジニアリング振興協会 海洋開発フォーラム) 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)」により実施された。

参考文献

- 1) Knauer G.A., Karl D.M., Martin J.H., Hunter C.N.: In situ effects of selected preservatives on total carbon, nitrogen and metals collected in sediment traps, *Journal of Marine Research*, 42, pp.445~462, 1984.
- 2) Roy R. N., Roy L. N., Vogel K. M., Porter-Moore C., Pearson T., Good C. E., Millero F. J., Campbell D. M.: The dissociation constants of carbonic acid in seawater at salinities 5 to 45 and temperatures 0 to 45 °C, *Marine Chemistry*, 44, pp.249~267, 1993.
- 3) Dickson A. G.: Standard potential of the reaction: $\text{AgCl}(s)+1/2\text{H}_2(g)=\text{Ag}(s)+\text{HCl}(aq)$, and the standard acidity constant of the ion HSO_4^- in synthetic seawater from 273.15 to 318.15 K, *Journal of Chemical Thermodynamics*, 22, pp.113~127, 1990.
- 4) Ikeda Y., Fukami K., Casareto B., Suzuki Y.: Refractory and labile organic carbon in coral reef seawater, *Galaxea*, 5, pp.11~19, 2003.
- 5) Richey J. E., Melack J. M., Aufdenkampe A. K., Ballester V. M., Hess L. L.: Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO_2 , *Nature*, 416, pp.617~620, 2002.
- 6) Frankignoulle M., Abril G., Borges A., Bourge I., Canon C., Delille B., Libert E., Theate J. M.: Carbon dioxide emission from European estuaries, *Science*, 282, pp.434~436, 1998.
- 7) Ikeda Y.: Carbon dynamics in the coral reef ecosystem, Ph.D.Thesis, University of Tokyo, 100pp. 1997.
- 8) Liss P., Merlivat L.: Air-sea gas exchange rates: field measurements, in "The role of air-sea exchange in geochemical cycling", *Adv. Sci. Inst. Ser.*, edited by Baut-Menard, Reidel D., Dordrecht, pp.113~127, 1986.
- 9) Redfield, A.C.: The biological control of chemical factors in the environment, *Am. Sci.*, 46(3), pp. 205~222, 1958.

Carbon Dynamics in the Mangrove Sea Area

— Source or Sink of Carbon Dioxide in Mangrove Sea Area —

Yutaka IKEDA

The carbon balance of mangrove ecosystem in Japan, Thailand, and Vietnam was investigated from 2000 to 2003. Mangrove ecosystem is consisted of two areas, i.e. land and sea. In the land area, mangrove has a role of carbon sink by photosynthesis, however, in the sea area, there are few phytoplanktons, and organic carbon is supposed to be decomposed. Here the decomposition rates of mangrove leaves and the organic matter in water were measured. The amount of carbon dioxide exchange between air and surface water as well as respiratory quotient was also evaluated.