

マングローブ生態系の持続的管理と CO₂ 固定量評価

松井直弘^{*1}・末国次朗^{*1}・森棟佳陽^{*2}

1. はじめに

1997年に京都でCOP3が開かれ、京都議定書の中で森林の吸収源が取り上げられたことでマングローブ生態系のCO₂吸収源としての役割に注目が集まるようになった。我々のマングローブへの取り組みも、この地球温暖化対策の動きがきっかけとなり、1995年の沖縄県・西表島でのバイオマス調査から始まり、翌1996年からのオーストラリア海洋科学研究所(AIMS)との共同研究、そしてタイの沿岸域で物質の分布と流れの把握、炭素の固定・循環・輸送過程の解明、および沿岸域でのCO₂吸収・固定化に関する機能を効果的に発揮させるための調査・研究に発展した。

タイなどの熱帯沿岸域では70年代から塩田やエビの養殖等の商業開発によりマングローブ林の伐採、その跡地放棄によって内陸側が破壊され、沿岸環境が悪化した。その修復を図るために吸収源評価とは別に2000年からタイ政府王立森林局(のちに海洋沿岸資源局)とマングローブ生態系保全に資する効果的な修復技術に関する調査研究を始めた。

弊社および関電グループが実施してきたマングローブ生態系のCO₂固定量評価および植林技術開発を中心としてこれまでに行ってきた実績と実施場所を表1に示した。本報告ではこのうちマングローブ生態系のCO₂固定量評価と環境保全機能について述べてみたい。

2. 主な成果

1) 炭素の固定・循環・輸送

オーストラリア、クイーンズランド州のヒンチンブルック島周辺およびタイ国、チュンポン地区のマングローブ林において光合成、呼吸、土壌中炭素集積速度や海洋域での炭素生産、消失、マングローブ生態系と海洋との間での炭素収支を解析した。その結果、海洋からもプランクトンに起因する沿岸域への炭素の流入があるが、マングローブ生態系に比べるとずっと少なく、マングローブが沿岸域で炭素収支の中心的な役割を担っていることが示された。一方、地下部に堆積する炭素量が膨大で、特に土壌に含まれる炭素量は人の攪乱を受けていないオーストラリア・ヒンチンブルック島のマングローブ林でhaあたり6,000tonCであると計算された。

2) 炭素蓄積速度

タイ・チュンポンの沿岸土壌で深さ10m近くまでボーリングを行い、層序を調べた結果、マングローブ由来の層は1.5mの深さがあり、年代測定によってそれらは1300から1800年前に堆積が始まったと推定された。これはマングローブがタイ湾に出現したのが三国志の赤壁の戦いから壬申の乱の時期であることを示唆しており、デルタ堆積物が平均海水面近くまで積もったことでマングローブが定着できるようになったものと考えられる。マングローブに由来する層は有機炭素が豊富であり、また炭素堆

Naohiro Matsui, Jiro Suekuni, Keiyo Morimune: Evaluation of CO₂ Fixation and Storage in Mangrove Ecosystem and Its Sustainable Management

^{*1}(株)環境総合テクノス 環境部, ^{*2}関西電力(株) 電力技術研究所 環境技術研究センター

表 1 KANSO テクノスのマングローブに関するこれまでの取り組み

課題	場所 / 地図番号	内容 (委託元)	
試験・研究 CO ₂ 吸収固定 量調査	オーストラリア・クイーンズラ ンド州	マングローブ生態系の炭素固定能力評価	
	タイ・スラタニ県	同上	
	西表島	同上	
調査	生態系調査	タイ・トラット県	マングローブ堆積物養分調査 (NEDO/JOIA)
		ベトナム・タンファン	同上
		石垣島	同上
		ミャンマー・エーヤワディ	マングローブ植林地調査 (ACTMANG)
		ベトナム・タンホア	同上
		エクアドル・グアヤキル	同上
		ベトナム・ハロン湾	沿岸地域環境の基礎調査 (OECC)
	ニッパヤシ	タイ・ナコンシタマラット県	ニッパヤシ樹液量調査
		フィリピン・ケソン	同上
	マレーシア・マレー半島東部	同上	
技術開発	植林技術開発	タイ・ナコンシタマラット県 ソククラ県, サムサコーン県	エビ養殖池荒廃地でのマングローブ植林
		ミャンマー・エーヤワディ	マングローブ保全管理計画策定 (JICA/ 日本工営)

積速度 (0.2-0.5 tCha⁻¹ year⁻¹) がデルタ堆積層速度 (0.1 tCha⁻¹ year⁻¹) に比べて速く、マングローブが旺盛な有機物生産を行っていることが示された。

3) マングローブ成長式の構築

植林後 2 年が経過した 25 ha のマングローブ植林地 (*Rhizophora apiculata*) でマングローブの成長 (樹高) を予測する式を作成した (式 1)。これまで地盤高とマングローブ成長との関係式はあったが、土壌因子を加えることでより精度高くマングローブの成長を予測できる式を作成した (Matsui *et al.* 2008)。

マングローブの成長に土壌要因が関係していることは、エビ養殖池跡地など熱帯沿岸域荒廃地におけるマングローブ植林で土壌改良などがある程度有効であることを示唆するもので、現在こうした知見を採用して荒廃地での植林に取り組んでいる。

$$\text{樹高 (cm)} = 58.30 + 13.96 \times \text{PC1} + 5.24 \times \text{PC3} \quad (r^2 = 0.65) \quad (\text{式 1})$$

PC1 は地盤高, pH, EC, 全炭素量, 炭素比, PC3 は交換性カルシウム, 交換性カリウムからなる合成変数 (合成変数の詳細については上記文献を参照ください。)

4) 水利環境の改善によるマングローブ林の再生

エビ養殖池の放棄地において水の循環を阻害している堰堤を取り壊すことで水利環境を改善させた。それによって以前は植林しても活着しなかった苗木の生存率と成長量が向上した。水利環境を改善した 6 年後には植林した樹種以外の在来マングローブ種 15 種が天然更新し、樹種の多様性が増加することが確認できた (Matsui *et al.* 2010)。水利環境の改

善は土壌中の炭素量も増加させた。エビ養殖池の堰堤であった箇所は土壌の乾燥化で土壌中の炭素量が2年間に半減したが、堰堤の取り壊しによって放棄地内に水の流入を促した箇所では同期間に炭素量は1.5倍に増加した。

水利環境の改善だけである程度までマングローブ林復元ができることは、コストのかかる人工植林を補完する植林手法として有望である。ただしこれが有効であるのは植林予定地の近傍に種子を供給しうる母樹が残されているなどの一定条件が必要である。

5) マングローブ土壌の緩衝能力

森林土壌は一般的に畑土壌に比べて緩衝能力が高いことが知られているが、マングローブ土壌はそれと同等、またはそれ以上の高い緩衝能力を持っている(図1)。その緩衝能力はマングローブ土壌が高い有機物含量を持っており、さらには物質を吸着する能力の高い脂肪族性腐植酸に富んでいることと関係が深い(Ebato *et al.* 2007)。緩衝能力の高さは陸域から沿岸域へ運ばれてくる農薬などの化学物質をマングローブ域が補足する能力が高いことを意味しており、マングローブが海洋汚染を防止する上でも重要な働きをしている可能性が示唆された。

6) マングローブ林持続的管理

タイのPred Nai村、Yi San村ではマングローブ林が長期間、持続的に利用・保全されている。

Pred Nai村はカニの収穫を主な収入源とし、Yi San村は木炭の販売を生業としている村である。これらの村でマングローブの持続的利用を可能にしている要因について検討したところ(Matsui 2010)、生産物を持続的に利用し、マングローブ資源の劣化を防ぐために村人が表2にあるような規則を自主的に作り、それを村人自身で守る仕組みを作っていることがわかった。カニ、マングローブ資源量の変動を測る基準も村人が自主的に設定しており、それに

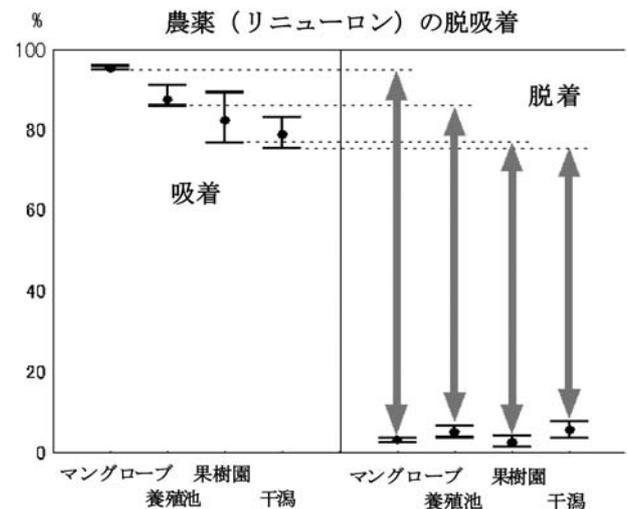


図1 マングローブ土壌の緩衝能力 (Ebato *et al.* 2007より)

表2 タイでマングローブを村で共有して持続的に管理している事例

	Pred nai 村	Yi san 村
マングローブ面積 (ha)	4,800	2,860
共有林発足年	1986	1980年代後半
主要な収入源	カニ	木炭
資源量評価の基準	カニの収穫量, カニ収穫に要する時間	材積
制限項目	カニ採取人の数	炭釜の数
禁止項目	1) マングローブ林中央部にある堀割りでのカニ収穫 2) 小さなサイズのカニ収穫 3) 化学薬品の使用	樹齢10年未満の木の伐採

より資源が過剰な収穫によって枯渇しないよう定期的に監視している。コミュニティによるマングローブの共有管理を考える上でこうした取り組みは貴重な教訓といえる。

7) マングローブを残した低負荷型、持続的養殖

タイ南部では養殖池の平均寿命はウイルス性の病気が発生するために5年と短い。このことが新規の場所での開発を促し、マングローブ林の減少を加速させる結果を招いてきた。タイのナコンシタマラットで30年以上にわたってエビ、カニ、魚の混養殖を伝統的に行っている池で水質のモニタリングを行い、持続的な養殖を可能としている要因を探索した。この池ではマングローブを切らずに池の中に残している（写真1）。水質調査の結果、一般の養殖池に比して窒素、リンの負荷量が少なく、そのことが池の寿命を延ばしていることがわかった。飼料の投下量は近代養殖池の1/5程度でそのことが水質の悪化を防ぐ要因であることが示された。ベントス、プランクトンが池の中のマングローブが供給する有機物を摂食、増殖し、それらがカニ、エビの給餌源となっていると推察された。こうした自然生態系を模倣したような環境保全型養殖方法はマングローブを破壊しない共生型の養殖法として有望なモデルと考えられる。



写真1 池の中にマングローブを植えたタイの持続的混養殖池（関西電力報告書(2006)より）

8) 無線ヘリによるマングローブ植林地のモニタリング

植林後にモニタリングすることで、生育状態およびCO₂固定量の評価が可能となる。植林面積が大きいとき、また特に足場の悪いマングローブ植林地ではリモートセンシングが有効な手法である。

マングローブが生育する熱帯や亜熱帯域においては、上空に雲があることが多く、良好な衛星画像を取得しにくい。我々はマングローブのバイオマスを調べる場合、満潮時に観測するのが樹冠の分光特性を正しく捉えることができることを確認し（Suekuni *et al.* 2007）、こうした条件では人工衛星や航空機より無線ヘリがモニタリングでは有効であると判断した（写真2）。無線ヘリは植林地まで待ちこむことができ、天候や潮位条件に左右されることが少ないなどの利点を持っている。

バイオマスを推定するためには有効な指標を択ぶ必要があるが、観測データの解析からR、G、B（赤、緑、青）の各バンドをそれぞれ単独で用いるより、 $G^2/(R \cdot B)$ が有効な指標であることを確認した。その指標を使ってエビの養殖池跡地におけるフタバナヒルギ（*Rhizophora apiculata*）植林3年後のバイオマスを推定したところ（写真3、図2）植林地の周辺部および南部でバイオマスが高いなど植林地



写真2 ボートをヘリポートとして離着陸する無線ヘリ



写真 3 無線ヘリから撮影した植林対象地

内のバイオマス分布を的確に把握することができた。

こうした無線ヘリによる解析はマングローブ植林地のバイオマス蓄積量推定のみならず、種々の環境調査と合わせることで多面的にマングローブの生育環境を診断できる有効な手段と考えられる。

3. まとめ

CO₂ 固定量評価からマングローブ生態系が炭素の一大貯蔵庫であることがわかり、大気中のCO₂ 固定、土壌中への炭素蓄積などを通じ熱帯沿岸域の炭素循環において重要な役割を担っていることが示された。しかし一方でマングローブ林地の炭素は酸化されると分解しやすく、不適切な開発によって容易にシンクからソースへと変わりうることが指摘された。開発によって熱帯沿岸地域には現在多くの荒廃地が残されている。数千年の歴史が刻まれたマングローブ生態系がわずか5年養殖に使われただけで荒廃地となる。タイを中心として荒廃地でマングローブ復元するための技術開発を行ってきたが、一旦、人為のかく乱を受けた土地でマングローブを復元するのは容易ではなく、特に成長の遅い樹種を回復させるのは極めて困難である。持続的なマングローブの生態系管理が早急に確立されることが望まれるが、当面はマングローブの減少速度を落とすような社会政策的な対応が必要と考えられる。

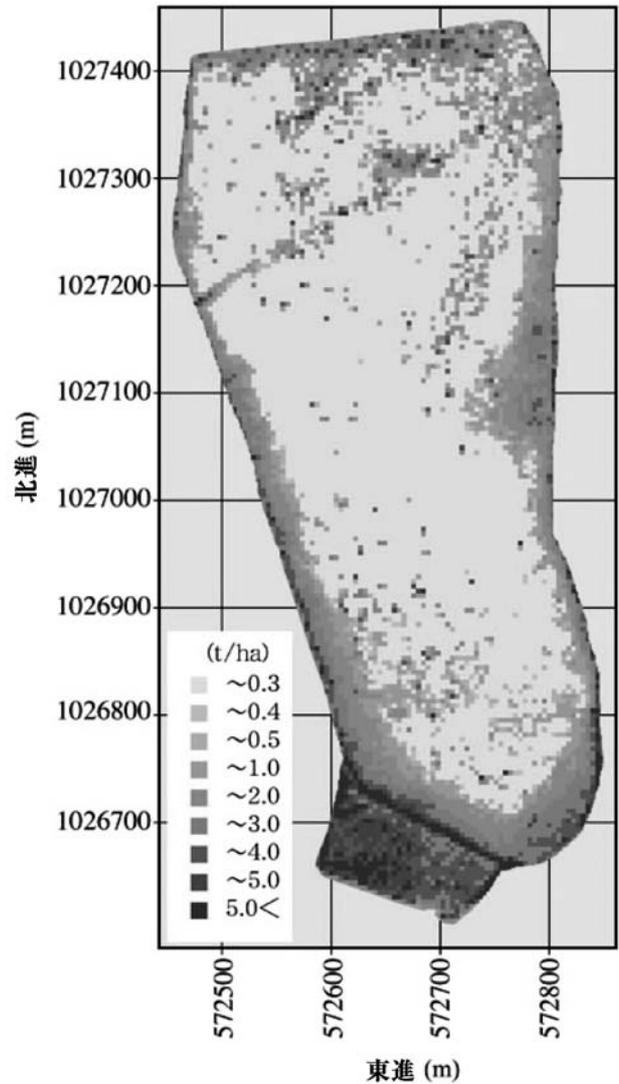


図 2 無線ヘリ空撮画像を基に推定したバイオマス分布図 (末国ら 2005 より)

〔出典〕 Ebato M, Matsui N, Nomura M, Yonebayashi K (2004) Estimation of buffering capacity of mangrove soils by using hydrophobic organic compounds, Atrazine and Linuron. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 50 (4), 477-484. 関西電力報告書 (2004, 2006) マングローブ生態系修復のための植林技術開発研究. Matsui N, Kosaki T (2007) Quantitative and qualitative evaluation on stored carbons of mangrove ecosystems in Chumphon, Thailand. *Mangrove Sci* 5 : 13-19. Matsui N, Suekuni J, Havanond S, Nishimiya A, Yanai J, Kosaki T (2008) Deter-

mination of soil-related factors controlling initial mangrove (*Rhizophora apiculata* BL.) growth in an abandoned shrimp pond. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54 (2) : 301-309. Matsui N, Suekuni J, Nogami M, Havanond S, Salikul P (2010) Mangrove rehabilitation dynamics and soil organic carbon changes as a result of full hydraulic restoration and re-grading of a previously intensively managed shrimp pond. *Wetlands Ecol Manage* 18 : 233-242. Matsui N (2010) Mangrove management and community participation in Thailand. In *Community and Coastal*

Zone Management, Chapter 20, 295-307

末国次朗, 野上誠, スウィット オンサムワン (2005) 空撮画像と GPS 比高データによるマングローブ (フタバナヒルギ: *Rhizophora apiculata* Bsl.) に適した生育条件の推定. 写真測量とリモートセンシング, Vol44, No.5, 42-49. Suekuni J, Hatayama K, Ongsomwang S (2007) Consideration of Effective Platform for Estimation of Above-Ground Biomass in Mangrove Plantation, Greenhouse Gas and Carbon Balances in Mangrove Coastal Ecosystems, 217-225

図書紹介

The Ecology of Tropical East Asia (東熱帯アジアの生態)

Richard T. Corlett 著

Oxford University Press, 2009 年, ISBN 9780199532469

出版から少々時間が経っているが、興味を持たれる方は多いと思うので紹介したい。本書の対象とする「東熱帯アジア」はいわゆる「東南アジア」ではなく、ASEAN 諸国からインドネシアのマルク、パプア等を除き、アンダマン・ニコバル諸島と北緯 30 度以南の中国と日本 (南西諸島) を加えた地域である。ミャンマーより西側の熱帯地域はより乾燥した地域であるのに対し、東熱帯アジアはより湿潤で森林が成立する地域であり、熱帯アジアの森林的な生物相を持つとの認識からである。

本書の特徴の一つは人為に関する記述が多いこと

で、植生や生物地理に関しても人為のもたらした植生・生物相と自然的に成立したそれらが並列的に述べられている。「本来の自然 (= 熱帯降雨林) に人為が外から関与する」という捉え方ではなく、人類の活動も自然の枠組みの中で捉えるというスタンスである。また、これまでの熱帯降雨林を扱った書物の記述が植物に偏る傾向があったのに比べ、本書は動物に関する記述が豊富であり、著者は偏らない視点を保つように努めたようだ。生物多様性保全に関しては、最後の 2 章で述べられているが、本書の本文の 3 割近い合計 61 ページを割いてかなり力を入れている。取り上げている題材や論点も、統計の信頼性、貧困、汚職、狩猟と野生動物の売買、侵入種の問題等、資金、教育、制度、生態系修復に関する踏み込んだ論議等、きわめて多義にわたっている。斬新な視点で書かれた良書としてご一読をお勧めする。
(松本和馬)