

マングローブ環境を支える物理過程

松田義弘

Physical processes supporting mangrove environments

Yoshihiro Mazda

Abstract: The mangrove natural environments are formed and preserved through feedback processes between biota, landform, water flow and atmosphere. These four factors are tightly connected with each other as compared with other temperate coastal areas in middle latitude. In this article, physical processes and mechanisms that have been investigated in mangrove areas are summarized.

Further studies for the conservation of the natural mangrove environments are expected.

Keywords: キーワード：マングローブ, 物理過程, 海水流動, 生態系, フィードバック

1. 遅れている物理過程の研究

マングローブ域の急速な破壊と退廃に対し、科学的知見に基づく適切な対策が求められている。その基礎となるマングローブ研究の歴史は古い。Snedaker and Snedaker (1984) によれば、既に1984年までにおよそ7000の研究論文が出版されている。しかし、その大半はマングローブの植物、群落、生理に関するものである。マングローブ域の海水流動を対象とした流体力学的研究は Wolanski *et al.* (1980) に始まり、マングローブ環境形成に対する物理過程の役割を最初に紹介したのは Kjerfve (1990) である。

Fig. 1 に示したように、Wolanski *et al.* (1980) 以後、物理過程の研究は蓄積されてきた。しかし、沿岸海洋学、海岸工学、水理学、水文学などの研究者は中緯度地域に集中しており、熱帯・亜熱帯という地理的遠方に位置するマングローブ域の物理過程に興味をもつ研究者は現在もなお極めて少ない。なお、図に見られるように和文の研究論文は英文で著わされた論文の1/3にも達するが、和文の研究成果は現地の研究者、技術者にはほとんど利用されない。

2. マングローブ域の特異な海水流動

2.1 地形に依存する海水流動

マングローブ地形は中緯度地域への河口、海岸地形と比べて特異的である。マングローブ地形は研究の目的によっていくつかの分け方ができる。本文では物理過程、特に海水流動の特徴を扱うのに適した Cintron and Novelli (1984) による以下の分類を用いる (Fig. 2)。

a) Riverine forest type (R型)：感潮水路 (tidal creek) に沿った湿地 (swamp) にマングローブ群落をつくるタイプである。creek もその枝流も強く蛇行しており、互いに錯綜している (Fig. 5 参照)。外海水は上げ潮で creek

を遡り、潮位の上昇によって swamp に氾濫する。下げ潮では creek を通って外海へ流出し、底泥面が干出する。swamp の岸寄りでは、creek を遡上する潮汐流に引きずられるため creek に平行な流れが卓越する。swamp 奥部では、creek と swamp の間の水面勾配により creek に直交する流れとなる。外海から進入する波浪は、長く蛇行する creek を遡上する間にエネルギーを消耗するので、swamp 内には殆ど進入しない (Mazda *et al.*, 2005)。

なお、多くの場合、外海に繋がる creek の出口 (河口) では水深が浅い sill 状となっている。従って、低潮時には外海との海水交換が抑制され、特に大潮の低潮時には creek の流れは止まり、マングローブ域は外海から孤立する (松田, 1997; 二瓶ら, 2003)。

b) Fringe forest type (F型)：外海に面した海岸線に沿って群落をつくるタイプであり、潮汐、波浪に直接曝されている。海水は上げ潮で海岸線に直交して浸入し、低潮時には底泥面は露出する。外海からの波浪も海岸線に直交して進入するが、樹木と地上根の抵抗により減衰し、樹木の奥までは達しない (Mazda *et al.*, 1997a)。

c) Basin forest type (B型)：雨期の大潮の高潮時に浸水が可能となる池状の地形に群落をつくるタイプである。乾期には、池の水位は外海水位との差がつくりだす地下水流によってゆっくりと変化する。この地下水の移動に伴って底泥中の種々の物質も移動・更新し、また池の底層水の鉛直混合が行われる (Mazda *et al.*, 1990a)。

Lugo *et al.* (1988) によれば、生態系の形成はこれらのタイプによって異なり、群落としての発達が高最も高いレベルにあるのはR型である。Mazda *et al.* (2007a) は各タイプで異なる地形-海水流動-生物環境の繋がりをそれぞれ図化している。

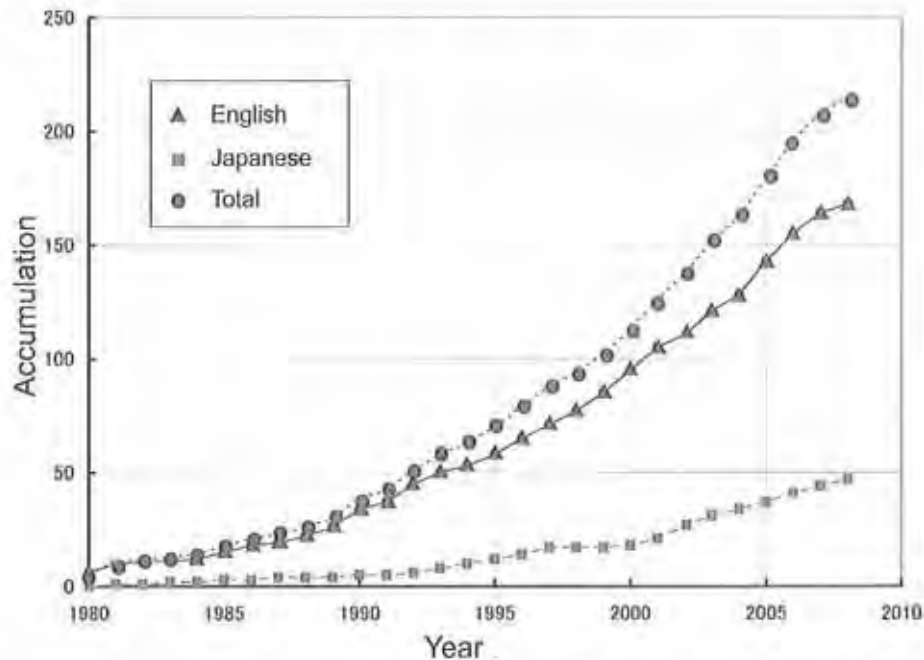


Figure. 1 Cumulative numbers of articles published by English (▲), Japanese (■) and the sum of them (●).

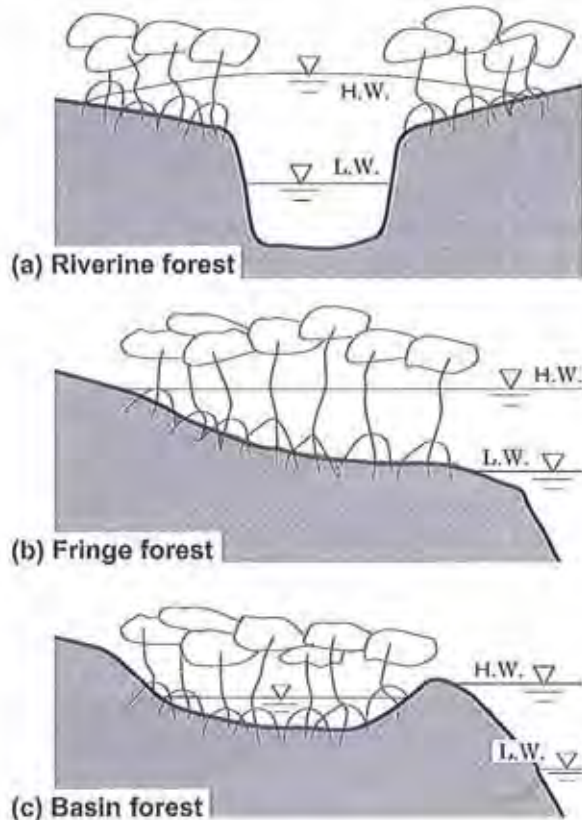


Figure. 2 Classification of mangrove topography (after Cintron and Novelli, 1984).

2.2 潮汐の振る舞い

マングローブ生態系を支える最も基本的な物理要素は1日2回あるいは1回の周期をもった潮汐による海水の運動である。Watson (1928), Chapman (1944), Lugo and Snedaker (1974), Bunt *et al.* (1985) は、マングローブ生態系を支配する要因として、地盤に対する潮汐の高さ、浸水持続時間、浸水頻度などが重要であろうと述べている。また、Boto and Bunt (1981), Woodroffe (1985) はマングローブ生態系維持の立場から、潮汐によるマングローブ域と外海の間での物質交換の重要性を指摘している。

Wolanski *et al.* (1980) はオーストラリアの Coral Creek において creek の下げ潮流速が上げ潮流速の2倍ほど大きいことを見出し、これが河口閉塞を防ぎ、マングローブ域と外海の間での物質交換を支えていると述べている。その後の多くの観測 (例えば, Wattayakorn *et al.* 1990; Lacombe and Ridd, 1995) および理論的検討 (Mazda *et al.*, 1995; Aucan and Ridd, 2000) により, creek で下げ潮流が卓越するのは、樹木が密集する広い swamp で大量の海水が氾濫する大潮期に生じる現象であり (Fig. 3), また, swamp では常に上げ潮流が卓越することが確かめられている。即ち, creek の潮汐流動は氾濫原のない河川と異なり, swamp への氾濫水量と樹木の抵抗に依存して大きく変化するという点に注意せねばならない。さらに, Wolanski and Ridd (1986), Ridd *et al.* (1990), Mazda *et al.* (1999) は creek 内の潮汐往復流と swamp に氾濫する

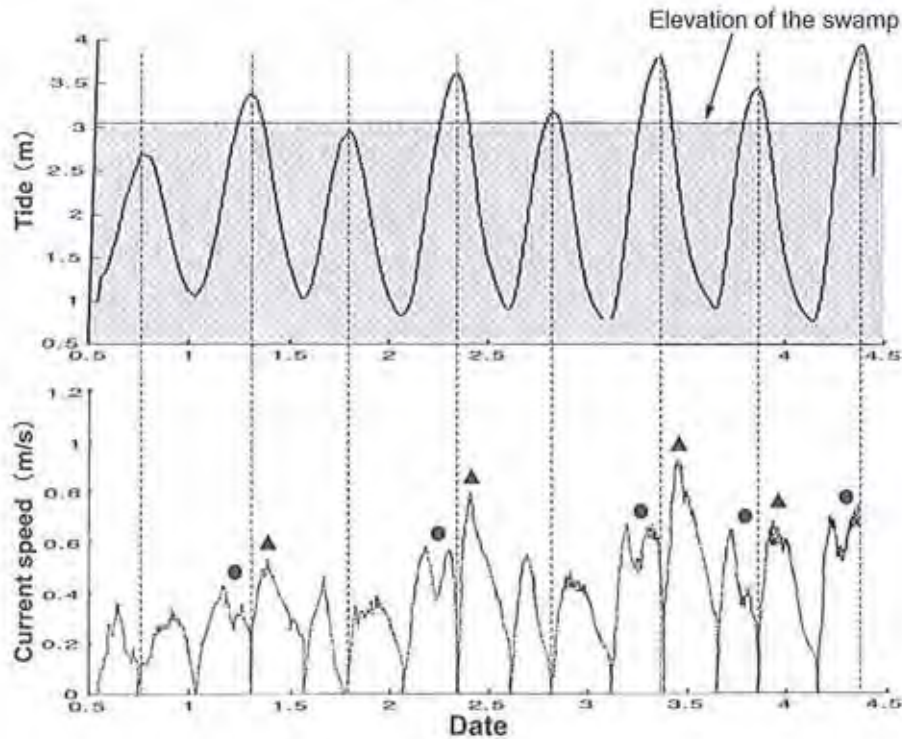


Figure. 3 Time series plots of the water level and the current speed in a tidal creek (Cocoa Creek, Australia). In the upper figure, the elevation of the swamp is shown. When the tidal level is higher than the elevation of the swamp, the ebb flow (▲) prevails against the flood flow (●). Further, the asymmetry between the ebb and flood flows increases with increasing tidal level (after Aucan and Ridd, 2000).

大量の海水の流体力学的相互作用による栄養塩やマングローブ種子の分散特性を解析モデルと数値実験で論じている。Furukawa *et al.* (1997) は、密集する地上根と潮汐流動の相互作用が強い渦群をつくり、上げ潮と下げ潮では底泥の巻き上がり・堆積機構が異なることを現地測定と数

値実験で示している。Mazda *et al.* (2005) は種々のフィールドでの測定結果に基づいて、潮汐流動に対する樹木の抵抗を定式化している。なお、マングローブの幹や地上根の立体形状、植生密度、樹種、成長度によって流体抵抗は大きく異なり (Sato, 1978; Mazda *et al.*, 1997b)。その抵抗に

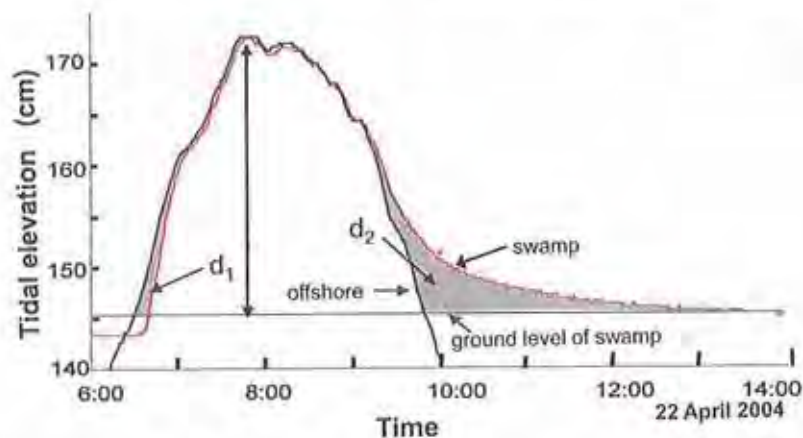


Figure. 4 Time series plots of water levels in a mangrove swamp and an offshore point, Aita-Gawa in Iriomote Island, Japan. The hatched areas d_1 and d_2 show the deformation of tidal level in the swamp from the offshore point (after Mazda and Kamiyama, 2007).

依存して、swamp内の潮汐は外海潮汐から大きく変形する。従って、Fig. 4に示したように、swamp内の浸水状況を外海潮汐から推測するときには注意を要する。

上記のように、マングローブ域の潮汐特性は外洋での潮汐また河口域での既往の知見とは大きく異なり、生態系との関係を考慮すると、以下の3点が特記される。

①鉛直方向の水位変動：低潮時には底泥面が干上がり、満潮時には樹木の幹も海水に浸かる。水位変動の幅（潮差）や満潮時の水深は大潮-小潮、平均水位の年間変動により大きく異なる（Mazda and Wolanski, 2009）。

②水平方向の海水流動：マングローブ樹林内への海水浸入距離は潮差、大潮-小潮、平均水位の年間変動によって大きく異なる。マングローブの植生限界はこれに依存する。また、この海水の往復流によって外海物質（溶解酸素、プランクトン、塩水など）が樹林内に運ばれ、樹林内の物質（落葉、マングローブ種子、ベントスの卵・稚仔、底泥、貧酸素水など）が外海に運ばれる。一方、海水の動き（流速）は樹木や地上根さらに底泥面の凹凸により抵抗を受けて、外海での運動とは大きく異なったものとなる。

③時間変動：低潮時には樹林の底泥は干上がっており、海水の運動は1潮時を通じて連続していない。また浸水している時間（浸水持続時間）や浸水の頻度は大潮-小潮、平均水位の年間変動により大きく異なる。

2.3 波浪—津波の振る舞い

外海からマングローブ樹林に進入する波浪はもう一つの重要な海水運動である。波浪は海水や底泥を攪拌してマングローブ環境に影響を与える一方で、密集したマングローブの樹木群は波浪を減衰させ、生態環境を安定化する。

Mazda *et al.* (1997a, 2006) はベトナムのマングローブ域において、台風時の波浪を減衰させるマングローブ樹木群の効果を定量的に示した。Masset *et al.* (1999) は樹木の流体抵抗が波浪の周期に依存することを考慮して、樹林内で波浪スペクトルが変形する効果を解析モデルにより論じている。古川 (2003) は沖縄のマングローブ域での測定に基づいて、波浪によるセディメントの巻き上がり、輸送、堆積と波高との関係を示している。これらの知見に基づいて、Hong (2004) は熱帯域、特にベトナムでの海岸浸食の防止にマングローブ樹林が有効であると述べている。しかしながら、マングローブの種類毎に異なる樹木の鉛直形状、植生密度、さらに波浪の大きさや周期に依存する波浪の減衰機構はまだ定式化されていない。

環境省自然環境局・(財) 国際マングローブ生態系協会 (2003) は西表島の仲間川において、また九州森林管理局・国際マングローブ生態系協会 (2006) は同じく西表島の浦内川において、遊覧船の高馬力エンジンと頻繁な航行による波が岸に打ち寄せ、*Bruguiera* 種の根を洗掘する実態を紹介している。

なお、上記の研究で得られた知見は風波やうねりのような30秒ほどよりも小さい周期の波を対象としたものであ

ることに注意せねばならない。2004年のスマトラ地震津波はマングローブ樹林を破壊し、一方でマングローブ樹林によって沿岸域が護られた。津波は10分から1時間ほどの周期をもっており、津波とマングローブ樹林の関係には上記の波浪や潮汐の知見を当てはめることはできない。田中ら (2005)、Yanagisawa *et al.* (2009) は上記のスマトラ地震津波での被害調査に基づいて、津波に対するマングローブ樹木の強度を論じている。一方、Kathiresan and Rajendran (2005)、Mazda *et al.* (2007b) は津波から人間生活を護るマングローブ樹林の特異な物理的役割を論じている。

2.4 地下水の振る舞い

マングローブ樹林内の海水流動を考えるときには、底泥面の上の流れ（表流水）だけでなく、底泥面下の地下水流を忘れてはならない。地下水流は、その流量が表流水に比べて極めて小さいため、無視されがちである。しかし、土壌の性質を決定し、その土質に依存する樹林の生態系を維持する地下水の役割は重要である。例えば、巣穴の無い場合に比べて透水係数は10-100倍大きく、樹林内に高密度で存在するカニ穴が土中の海水や溶存物質の透過性を高め、土質の維持に貢献している（Mazda *et al.*, 1990b; Ridd and Sam, 1996; Stieglitz *et al.*, 2000; Susilo *et al.*, 2005）。R型、B型ではF型に比べて地下水の流動は活発である。特に、R型のcreekに近い岸寄りでは地下水面の勾配が大きいため、地下水流出が強く、土壌表面の乾燥が速い（Mazda and Ikeda, 2006）。また、B型では地下潮汐の往復流による物質交換機能を無視できない（Mazda *et al.*, 1990a）。

一方、枯葉や空洞化した地下根の堆積により形成されるマングローブ樹林の土壌は極めて等質性に欠け、さらに巣穴等の存在により地下水の振る舞いは強い局所性をもっている。Ridd (1996)、Sam and Ridd (1998)、Susilo and Ridd (2005) はこれらの局所性に対応した測定機器の開発、現地調査、模型実験、数値実験により、地下水流動の振る舞い、その水理機構、さらに土壌・土質の形成過程を精力的に追究している。

3. 環境形成に対する物理過程の役割

3.1 マングローブ地形の形成

潮汐や波浪によって樹林内に浸入した海水流動はswampの地形、密集するマングローブ樹木、さらに錯綜する地上根の存在で曲げられて新たなcreekを作ったり、地下に潜ったりする。言い換えれば、これらの流れに伴って生じる底泥の移動はswampの地形を変え、creekを蛇行させ、ときにはマングローブ樹林に接していない海岸を間接的に侵食するきっかけとなる（Mazda *et al.*, 2002）。例えばWolanski *et al.* (1998) はオーストラリアのHinchinbrook Channelでの現地調査により、大潮期の上げ潮時にswamp内にセディメントが取り込まれて

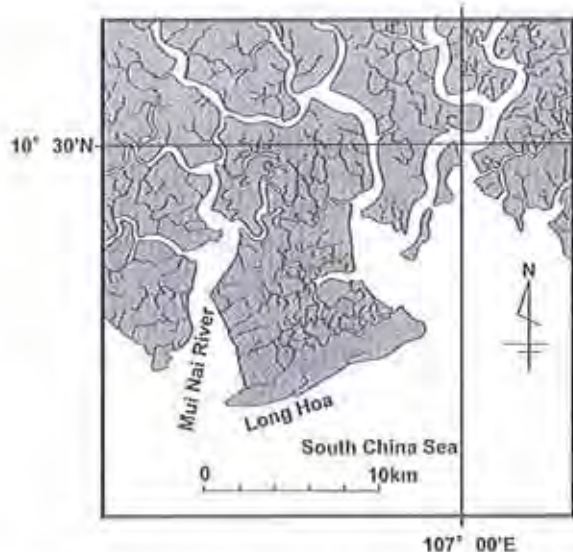


Figure. 5 The area map around the Long Hoa coast in southern Vietnam.

creek が蛇行していくことを示している。Furukawa and Wolanski (1996) はオーストラリアの Middle Creek で、また Brinkman *et al.* (2005) はタイの Sawi 湾での測定に基づいて、マングローブの地上根がセディメントを捕捉・堆積させる役割をしており、その結果として過度の巻き上がりや堆積から生態系が護られていると述べている。

マングローブ域は Fig. 5 に見られるように、無数の creek とその枝流の存在により極めてフラクタルなパターンをもっている。このような creek の交錯するネットワークは海水流動、地形、樹木群の間の相互作用により作りだされると思われる。3.4 節で述べるように、このネットワークはここでの生態系に重要な役割を果たしており、この形成過程および物理機構は極めて興味深い。内陸での川とその枝流の分岐やネットワークに関する定量的な研究は、Horton (1945) 以後、地理・地形学として発展してきている。しかし、マングローブ域の極めて緩い地盤勾配、軟らかい泥質の基盤、潮汐周期で浸水・干出する海水の往復運動などを考えると、creek のネットワークをつくり出す機構は内陸でのものとは大きく異なると思われる。D'Alpaos *et al.* (2009) は植生が密集する干潟の creek 形成モデルを提案している。彼らは、モデルは未だ初歩的な段階にあるが、干潟域での生物地形のモデル化 (bio-geomorphological modeling) においては生物過程と物理過程を別個に扱ってはならないと言っている。一方、Yagi *et al.* (2005, 2006) もマングローブ樹林の地形と creek のネットワーク形成に関する数学的モデルの展開を進めている。

3.2 マングローブ域と外海の相互作用

多くの場合、マングローブ樹林の外海側は植生の無い砂泥干潟を挟んでサンゴ礁となっている。外海に起源をもつ水温、塩分、溶存酸素、栄養塩などは樹林内の生態系に直接、間接的に影響を与えている。外海から樹林内に流入した海水の水質は林内での循環、滞留、混合、分散といった物理過程を経て時間的、空間的に大きく変質する。そして、下げ潮で流出するときの水質は干潟、サンゴ礁の生態系に強く影響する。例えば、サンゴ礁で光合成により生成された大量の酸素が上げ潮で樹林に供給されてベントスの活動を支え (Mazda *et al.*, 1990b)、一方、樹林から流出した栄養物質はサンゴ礁の多様な生物活動に欠かせない (土屋・藤田, 2009)。さらに、干潟を仲介して外海とマングローブ樹林の間で干渉し合う物理過程は Ong *et al.* (1991)、Dyer *et al.* (1992)、Medeiros and Kjerfve (1993)、Wolanski *et al.* (2001)、Nihei *et al.* (2004)、古川 (2008) が自然環境形成の観点から整理している。

マングローブ樹林とその外海側海域の物質交換機構は R 型、F 型、B 型の地形によって大きく異なる。R 型では潮汐作用で creek から氾濫することにより行われる (Mazda *et al.*, 1990b; Wolanski, 1992; Ridd *et al.*, 1997)、F 型では外海に面した海岸で潮汐、波浪により直接行われる (Wada and Takagi, 1988; 松田, 2007)、B 型では地下水により行われる (Twilley *et al.*, 1986; Mazda *et al.*, 1990a; Susilo *et al.*, 2005)。

3.3 大気・陸域の影響

マングローブ域の物理過程の中でも太陽光、降雨、蒸発、気温、湿度、風などの大気に関する研究は極めて少ない (佐藤・小田, 1985)。厚いマングローブの樹冠によって大気と樹林内とが隔離され、樹林内では独自の気候環境 (microclimate) が形成されると考えられるからであろう。しかし、マングローブ生態系にとって、またマングローブ樹林の後背地で生活する住民にとってこれらの大気要素の振る舞いは重要であると指摘されている。例えば、マングローブ樹林は風のエネルギーを吸収し、樹林背後の内陸部での塩害を防ぐ (Wolanski *et al.*, 2009)。季節的に大きく変動する降雨に対応した河川流出はマングローブ河口域で生じている水質変化や生物・化学・地形過程に影響を与える (Wattayakorn *et al.*, 1990, 2000; Wolanski and Cassagne, 2000)、creek から広い swamp に氾濫した大量の海水が強い蒸発により高塩分となり、下げ潮で creek に流出して海水密度を高くし、上流部と下流部の物質交換を遮断する (Wolanski, 1992; Ridd and Stieglitz, 2002)。一方、マングローブ樹林の伐採や埋め立て、また上流でのダム建設、内陸部の土地開発は creek の潮汐流量を大きく変化させ、直接接していない河口、海岸を浸食し、沿岸生態系を攪乱する (Fig. 6; Mazda *et al.*, 2002; Mazda *et al.*, 2007a)。Wolanski *et al.* (2009) はこれらの知見を総括して、マングローブ環境は沿岸域、河口、川、その流域の総



Figure. 6 Corals covered by mud discharged from a mangrove swamp in Missionary Bay, Australia (Mazda *et al.*, 2007a).

てを網羅した総合生態水文学 (total eco-hydrology) として認識されねばならないと主張している。

3.4 物理過程と生態系間のフィードバック関係

tidal creek の蛇行, creek の断面内での二次流と海水密度の分布はマングローブの胎性種子の広域分散に重要な役割を果たしている (Wolanski, 1995; Ridd *et al.*, 1998; Kuwabara, 2002)。creek 河口でのセディメントの堆積はマングローブ域と外海との海水交換を阻害し、マングローブ生態系の衰退をもたらす (Wolanski *et al.*, 1980; Mazda *et al.*, 1990b)。マングローブ樹林とその生態系が長年月を経て形成されたものであることを考えると、この長い年月の間で繰り返される潮汐の浸入、特にその頻度、浸水高さ、浸水持続時間などの水理機構と生物の生理・生態の間のフィードバックまたは相互作用の過程が極めて重要であるといえる (Bunt *et al.*, 1985; Mazda *et al.*, 1990b; Mazda and Kamiyama, 2007)。

マングローブ域の自然環境を形成するフィードバック関係を Fig. 7 に示した。生物、地形、海水流動、大気の間には種々のフィードバックが働いている。例えば、潮汐に伴って生じる海水流動は樹林内に溶存酸素を送り込み、栄養塩を分散させる。溶存酸素、栄養塩と太陽放射により成長するマングローブ樹木とその周囲の生物群は、枯葉を破砕し、分解して土壌を蓄積し、地形をつくりだす。こうしてつくられた地形、さらにマングローブの樹木と地上根を含めた生物地形は抵抗体となって海水流動の強さと方向を変える。このような 4 要素間のフィードバックはまた逆方向に、さらに、それぞれの 2 要素の間でも生じている。

樹林内を錯綜する無数の creek とその枝流は海水、栄養塩、溶存酸素、魚貝類の卵・稚仔等を樹林の奥まで運び、一方、貧酸素水や富栄養の土壌を外海に効率的に運び出す

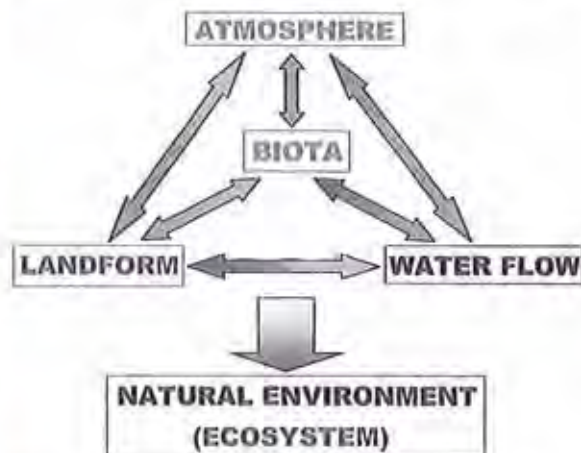


Figure. 7 Feedback processes in mangrove ecosystems.

役割をしている。この creek のネットワークは人間の生体を支えている動・静脈と毛細血管に喩えられる。毛細血管的ネットワークはマングローブ生態系が自身を維持するために作り出した巧まざる知恵といえる。さらに、マングローブ樹林の中に人工的に造成したエビ養殖池の維持にもこの creek のネットワークによる外海との海水交換は重要な役割を果たしている (Hon and San, 1993; Mazda *et al.*, 2007a)。一方、これらの養殖池の造成は自然のフィードバックによって形成・維持されてきた上記のネットワークに人工的な外圧を加えることになり、その結果、河口閉塞や河口に隣接する海岸浸食をもたらす可能性をもっている (Mazda *et al.*, 2002; Wolanski *et al.*, 2009)。creek のネットワークに関する定量的な評価は、生態系の維持と有効利用のためにも、今後の重要な課題である。

4. 今後の課題

1995 年の日本マングローブ学会における記念講演で、タイ国環境研究所所長の Dr. S. Aksornkoae が“日本のマングローブ研究は基礎的、理学的傾向が強く、それは大切なことではある。しかし、熱帯・亜熱帯の現地では、現在、マングローブ環境が危機的状況にあり、これに直接対応できる応用研究にも力を入れて欲しい”と述べている。マングローブ生態系と物理過程の相互関係を定式化し、環境維持と有効利用に実用化することがフィールド科学としてのマングローブ物理学の重要な役割である。この目的のために、マングローブ域に特異な多くの物理要素が見出され、それらの振る舞いと機構が解明されてきた。しかしながら、これらの物理過程と生態系との間の繋がりは未だ定量化されていない。例えば、マングローブ樹林に伐採、養殖池の造成、道路の建設のような人為的な物理作用が加えられたとき、生態系がどのように応答するかを定量的に予測す

ることはできていない (Mazda and Wolanski, 2009)。

今後は以下の手順によって系統的なマングローブ研究が進められねばならない。

- ①物理過程の研究の歴史は極めて浅く、知見の殆どが局所性をもったケーススタディによるものである。多くの異なる地点、種々の条件でのデータの蓄積が必要である。
- ②上記①に基づいて、マングローブ域に固有な物理過程が抽出されねばならない。
- ③マングローブ域に固有な物理過程とその機構の定式化がなされねばならない。
- ④マングローブ生態系に対する物理過程の役割を見出すために、物理分野の研究者と生態学、生物学分野の研究者による緊密な連携のもとでの共同研究がなされねばならない。
- ⑤既往の生態系モデルをそのまま適用することを避け、マングローブ域の特異性を十分に考慮した定量的モデルが構築されねばならない。

密集・錯綜し、立体形状をもった樹林、周期的に浸水・干出する地盤面、軟泥と無数の巣穴による地下水、蛇行する tidal creek のネットワーク、creek と swamp の相互作用、生態系にフィードバックする生物地形の変化、そして、陸域から外海までの間での相互作用はここでの特異な生態系モデルを構成する重要な物理要素である。これらの物理要素と生態系の繋がりが定量的に定式化されるまでは、マングローブ生態系を維持し、有効に利用することはできない。特に、上記研究を遂行するために、マングローブ域の物理過程に興味をもつ若い学生の力が期待される。

マングローブ生態系は陸域、河口域、沿岸域、そして外洋の間の強いフィードバック作用、即ち、total ecohydrology の構造の中で成立している (Wolanski *et al.*, 2009)。一方、大きく異なる時間スケール、空間スケールをもった生物、化学、物理要素の間の入り組んだ非線形的な相互作用を通してマングローブ生態系は遷移して現在に至っている。異分野の研究者を網羅した同一地点での同一時のフィールド調査が蓄積されて初めて、マングローブ生態系を維持し、人間活動との共生をはかることが可能となる。

紙数に制限があり、Fig. 1 に示した多くの研究成果を割愛せざるを得なかった。本文では、出来る限りこれらを検索できる論文を引用した。

引用文献

Aucan, J. and P.V. Ridd (2000) Tidal asymmetry in creek surrounded by saltflats and mangroves with small swamp slopes. *Wetlands Ecology and Management*, 8, 223-231.

Boto, K.G. and J.S. Bunt (1981) Tidal export of particulate organic matter from a northern Australian mangrove

system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 13, 247-255.

Brinkman, R., G. Wattayakorn, E. Wolanski, S. Spagnol and K. Marshall (2005) Storm-driven erosion of fine sediment and its subsequent transport and trapping in fringing mangroves, Sawi Bay, Thailand. *J. Coastal Research*, 42, 211-220.

Bunt, J.S., W.T. Williams and E.D. Bunt (1985) Mangrove species distribution in relation to tide at the seafront and up rivers. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 36, 481-492.

Chapman, V.J. (1944) The 1939 Cambridge University expedition to Jamaica. II. A study of the environment of *Avicenia nitida* Jacq. In Jamaica. *J. Linnean Soc. Bot.*, 52, 448-486.

Cintron, G. and Y.S. Novelli (1984) Methods for studying mangrove structure. In, *The Mangrove Ecosystem: Research Methods* (eds. S.C. Snedaker and J.G. Snedaker), UNESCO, 91-113.

D'Alpaos, A., S. Lanzoni, A. Rinaldo and M. Marani (2009) Intertidal eco-geomorphological dynamics and hydrodynamic circulation. In, *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach* (eds. G.M.E. Perillo, E. Wolanski, D.R. Cahoon and M.M. Brinson), Elsevier, Amsterdam, 159-184.

Dyer, K.R., W.K. Gong and J.E. Ong (1992) The cross sectional salt balance in a tropical estuary during a lunar tide and a discharge event. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 34, 579-591.

Furukawa, K. and E. Wolanski (1996) Sedimentation in mangrove forests. *Mangroves and Salt Marshes*, 1, 3-10.

Furukawa, K., E. Wolanski and H. Mueller (1997) Currents and sediment transport in mangrove forests. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44, 301-310.

古川恵太 (2003) マングローブ林の土砂堆積環境に及ぼす波浪の影響。平成14年度内閣府委託調査研究 マングローブに関する調査研究報告書、亜熱帯総合研究所、257-263.

古川恵太 (2008) サンゴ礁に守られている沿岸域の環境。沿岸海洋研究、46, 41-46.

Hong, P.N. and H.T. San (1993) *Mangroves of Vietnam. The IUCN Wetlands Programme*, IUCN, Bangkok, Thai, 173pp.

Hong, P.N. (2004) *Mangrove Ecosystem in the Red River Coastal Zone*. Agricultural Publishing House, Hanoi, 509pp.

Horton, R.E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 56, 275-370.

- 環境省自然環境局・(財) 国際マングローブ生態系協会 (2003) 平成14年度 仲間川マングローブ林被害防止対策追跡調査報告書, 25pp.
- Kathiresan, K. and N. Rajendran (2005) Coastal mangrove forests mitigated tsunami. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65, 601-606.
- Kjerfve, B. (1990) Manual for Investigation of Hydrological Processes in Mangrove Ecosystems. The UNESCO/UNDP Regional Project "Mangrove Ecosystems in Asia and the Pacific" RAS/79/002 and RAS/86/120, Thomson Press, 79pp.
- Kuwabara, R. (2002) The role of the centroid in viviparous seeds of mangroves for transportation and dispersal. *Mangrove Science*, 2, 29-35.
- 九州森林管理局・国際マングローブ生態系協会 (2006) 平成17年度 浦内川マングローブ林被害防止対策調査報告書, 九州森林管理局西表森林環境保全ふれあいセンター・特定非営利活動法人 国際マングローブ生態系協会, 70pp.
- Lacombe, P. and P.V. Ridd (1995) Megaripple dynamics and sediment transport in a mesotidal mangrove creek - implications for palaeoflow reconstruction. *Sedimentology*, 42, 593-606.
- Lugo, A.E. and S.C. Snedaker (1974) The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5, 39-64.
- Lugo, A.E., S. Brown and M.M. Brinson (1988) Forested wetlands in fresh-water and salt-water environments. *Limnology and Oceanography*, 33, 894-909.
- Massel, S.R., K. Furukawa and R.M. Brinkman (1999) Surface wave propagation in mangrove forests. *Fluid Dynamics Research*, 24, 219-249.
- 松田義弘 (1997) マングローブ水域の物理過程と環境形成 - 自然の保護と利用の基礎. 黒船出版, 静岡, 196pp.
- 松田義弘 (2007) 干潟の海水流動. *海洋調査技術*, 19, 45-49.
- Mazda, Y. and Y. Ikeda (2006) Behavior of the groundwater in a riverine-type mangrove forest. *Wetlands Ecology and Management*, 14, 477-488.
- Mazda, Y. and K. Kamiyama (2007) Tidal deformation and inundation characteristics within mangrove swamps. *Mangrove Science*, 4,5, 21-29.
- Mazda, Y. and E. Wolanski (2009) Hydrodynamics and modeling of water flow in mangrove areas. In, *Coastal Wetlands: An integrated ecosystem approach*. (eds. G.M.E. Perillo *et al.*) Elsevier, Amsterdam, 231-262.
- Mazda, Y., H. Yokochi and Y. Sato (1990a) Groundwater flow in the Bashita-Minato mangrove area, and its influence on water and bottom mud properties. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31, 621-638.
- Mazda, Y., Y. Sato, S. Sawamoto, H. Yokochi and E. Wolanski (1990b) Links between physical, chemical and biological processes in Bashita-Minato, a mangrove swamp in Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31, 817-833.
- Mazda, Y., N. Kanazawa and E. Wolanski (1995) Tidal asymmetry in mangrove creeks. *Hydrobiologia*, 295, 51-58.
- Mazda, Y., M. Magi, M. Kogo and P.N. Hong (1997a) Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam. *Mangroves and Salt Marshes*, 1, 127-135.
- Mazda, Y., E. Wolanski, B. King, A. Sase, D. Ohtsuka and M. Magi (1997b) Drag force due to vegetation in mangrove swamps. *Mangroves and Salt Marshes*, 1, 193-199.
- Mazda, Y., N. Kanazawa and T. Kurokawa (1999) Dependence of dispersion on vegetation density in a tidal creek-mangrove swamp system. *Mangroves and Salt Marshes*, 3 (1), 59-66.
- Mazda, Y., M. Magi, H. Nanao, M. Kogo, T. Miyagi, N. Kanazawa and D. Kobashi (2002) Coastal erosion due to long-term human impact on mangrove forests. *Wetlands Ecology and Management*, 10, 1-9.
- Mazda, Y., D. Kobashi and S. Okada (2005) Tidal-scale hydrodynamics within mangrove swamps. *Wetlands Ecology and Management*, 13, 647-655.
- Mazda, Y., M. Magi, Y. Ikeda, T. Kurokawa and T. Asano (2006) Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp.. *Wetlands Ecology and Management*, 14, 365-378.
- Mazda, Y., E. Wolanski and P.V. Ridd (2007a) The Role of Physical Processes in Mangrove Environments. TERRAPUB, Tokyo, 598pp.
<http://www.terrapub.co.jp/e-library/matsuda/index.html>
- Mazda, Y., F. Parish, F. Danielsen and F. Imamura (2007b) Hydraulic functions of mangroves in relation to tsunamis. *Mangrove Science*, 4,5, 57-67.
- Medeiros, C. and B. Kjerfve (1993) Hydrology of a tropical estuarine system: Itamaraca, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36, 495-515.
- 二瓶康雄・中村武志・網島康雄 (2003) 現地観測に基づくマングローブ河口域における sill 形状と海水交換特性の検討. *海岸工学論文集*, 50, 1121-1125.
- Nihei, Y., K. Sato, Y. Aoki, T. Nishimura and K. Nadaoka (2004) An application of a nesting procedure to a highly-resolved current simulation in a mangrove area. APAC2003, CD-ROM, 1-8.
- Ong, J.E., W.K. Gong, C.H. Wong, Z.H. Din and B. Kjerfve (1991) Characterization of a Malaysian

- mangrove estuary. *Estuaries*, 14, 38-48.
- Ridd, P.V. (1996) Flow through animal burrows in mangrove swamps. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 43, 617-625.
- Ridd, P.V. and R. Sam (1996) Profiling groundwater salt concentrations in mangrove swamps and tropical salt flats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 43, 627-635.
- Ridd, P.V. and T. Stieglitz (2002) Dry season salinity changes in tropical mangrove and salt flat fringed estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 1039-1049.
- Ridd, P., E. Wolanski and Y. Mazda (1990) Longitudinal diffusion in mangrove fringed tidal creeks. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31, 541-554.
- Ridd, P.V., R. Sam, S. Hollins and G. Brunskill (1997) Water, salt and nutrient fluxes of tropical tidal salt flats. *Mangroves and Salt Marshes*, 1, 229-238.
- Ridd, P.V., T. Stieglitz and P. Larcombe (1998) Density-driven secondary circulation in a tropical mangrove estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47, 621-632.
- Sam, R. and P.V. Ridd (1998) Spatial variation of groundwater salinity in a mangrove-salt flat system. Cocoa Creek, Australia. *Mangroves and Salt Marshes*, 2, 121-132.
- Sato, K. (1978) Studies on the protective functions of the mangrove forest against erosion and destruction. (I) The morphological characteristics of the root system of *Yaeyamahirugi* (*Rhizophora mucronata* LAMK). *Sci. Bull. Coll. Agr. Univ. Ryukyus*, 25, 615-630.
- 佐藤一紘・小田一幸 (1985) ヤエヤマヒルギ・オヒルギの風に対する強度について. 日本林学会九州支部研究論文集, No. 38, 329-330.
- Snedaker, S.C. and J.G. Snedaker (1984) *The mangrove Ecosystem: Research Methods*. UNESCO, 251pp.
- Stieglitz, T., P.V. Ridd and P. Muller (2000) Passive irrigation and functional morphology of crustacean burrows in a tropical mangrove swamps. *Hydrobiologia*, 421, 69-76.
- Susilo, A. and P.V. Ridd (2005) The bulk hydraulic conductivity of mangrove soil perforated with animal burrows. *Wetlands Ecology and Management*, 13, 123-133.
- Susilo, A., P.V. Ridd and S. Thomas (2005) Comparison between tidally-driven groundwater flow and flushing of animal burrows in tropical mangrove swamps. *Wetlands Ecology and Management*, 13, 377-388.
- 田中則夫・佐々木亨・湯谷賢太郎・S. Homchuen (2005) 津波防御に対する樹林幅と樹種影響について - インド洋大津波におけるタイでの痕跡調査結果 -. 海岸工学論文集, 52, 1346-1350.
- 土屋誠・藤田陽子 (2009) *サンゴ礁のちむやみ*. 東海大学出版会, 秦野市, 203pp.
- Twilley, R.R., A.E. Lugo and C. Patterson-Zucca (1986) Litter production and turnover in basin mangrove forests in southwest Florida. *Ecology*, 67, 670-683.
- Wada, H. and T. Takagi (1988) Soil-water-plant relationships of mangroves in Thailand. *Galaxea*, 7, 257-270.
- Watson, J.G. (1928) *Mangrove forests of the Malay Peninsula*. Malayan Forest Records No.6, Forest Department, Federated Malay States, Kuala Lumpur, 275pp.
- Wattayakorn, G., E. Wolanski and B. Kjerfve (1990) Mixing, trapping and outwelling in the Klong Ngao mangrove swamp, Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31, 667-688.
- Wattayakorn, G., T. Ayukai and P. Sojisuporn (2000) Material transport and biogeochemical processes in Sawi Bay, southern Thailand. *In*, Carbon Cycling in a Tropical Coastal Ecosystem, Sawi Bay, Southern Thailand (eds. B.E. Brown and P. Limpsachol), Phuket Marine Biological Center Special Publication, 22, 63-77.
- Wolanski, E. (1992) Hydrodynamics of mangrove swamps and their coastal waters. *Hydrobiologia*, 247, 141-161.
- Wolanski, E. (1995) Transport of sediment in mangrove swamps. *Hydrobiologia*, 295, 31-42.
- Wolanski, E. and P.V. Ridd (1986) Tidal mixing and trapping in mangrove swamps. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 23, 759-771.
- Wolanski, E. and B. Cassagne (2000) Salinity intrusion and rice farming in the mangrove-fringed Konkoure River delta, Guinea. *Wetlands Ecology and Management*, 8, 29-36.
- Wolanski, E., M. Jones and J.S. Bunt (1980) Hydrodynamics of a tidal creek-mangrove swamp system. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 31, 431-450.
- Wolanski, E., S. Spagnol and T. Ayukai (1998) Field and model studies of the fate of particulate carbon in mangrove-fringed Hinchinbrook Channel, Australia. *Mangroves and Salt Marshes*, 2, 205-221.
- Wolanski, E., Y. Mazda, K. Furukawa, P. Ridd, J. Kitheka, S. Spagnol and T. Stieglitz (2001) Water circulation in mangroves, and its implications for biodiversity. *In*, Oceanographic Processes of Coral Reefs (ed. E. Wolanski), CRC Press, London, 53-76.
- Wolanski, E., M.M. Brinson, D.R. Cahoon and G.M.E. Perillo (2009) *Coastal Wetlands: A Synthesis*. *In*, Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach. (eds. G.M.E. Perillo, E. Wolanski, D.R. Cahoon and

- M.M. Brinson) Elsevier, Amsterdam, 1-62.
- Woodroffe, C.D. (1985) Studies of a mangrove basin, Tuff Crater, New Zealand: III. The flux of organic and inorganic particulate matter. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 20, 447-461.
- Yagi, A., T.H. Ho and C. Duc (2005) A mathematical model for mangrove forest dynamics. *Annula Report of FY 2003, Core University Program between JSPS and NCST, Fujita Laboratory, Graduate School of Engineering, Osaka University*, 299-303.
- Yagi, A., T. Miyagi and P.N. Hong (2006) A mathematical model for mangrove geo-ecosystem focusing on interactions between trees and soils. *Annula Report of /FY 2005/, Core University Program between JSPS and VAST, eds. M. Ike and P. H. Viet, Ike Laboratory, Graduate School of Engineering, Osaka University*, 285-288.
- Yanagisawa, H., S. Koshimura, K. Goto, T. Miyagi, F. Imamura, A. Ruangrassamee and C. Tanavud (2009) The reduction effects of mangrove forest on tsunami based on field surveys at Pakalang Cape, Thailand and numerical analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81, 27-37.