

マングローブ根系と流れの相互作用

古川恵太¹⁾

Interaction between mangrove root system and flow

Keita Furukawa

Abstract: Research publications on interactions between mangrove root systems and flow are reviewed. Firstly, based on Mazda (2010), a review of physical processes such as tidal flow, waves, and ground water flow in mangrove forests is updated. In addition to that, interactions between mangrove root systems and flow are classified and reviewed; namely 1) the wake behind a single stem and root of a mangrove tree, 2) the wake behind stems and roots, 3) flow in a simple swamp with mangroves, 4) flow in a swamp with a secondary creek network, 5) flow in R-type mangal, 6) flow in F-type mangal, 7) holistic circulation in watersheds and bay systems, and 8) an integrated view of ecosystem networks. These interactions can be a clue to understanding future changes of environment in mangrove forests and surrounding coastal areas. Mangrove forests will play an important role in adaptation to and mitigation of global warming, implementation of Eco- DRR (Disaster Risk Reduction by Ecosystem), and achieving SDGs (Sustainable Development Goals). By this review, the importance of physical-based monitoring and adaptive management to sustain mangrove forests is highlighted.

Keywords: Mangroves, Marine ecosystem, Sediment transport, Water circulation

1. はじめに

マングローブ林は熱帯、亜熱帯の潮間帯に広がる典型的な沿岸生態系である。マングローブ林を特徴づけるものが、柔らかな砂泥や泥炭等の2次元的な基盤と硬質な気根や支柱根の3次元的な広がりを持つ複雑な場であり、本稿ではこうした基盤とマングローブが形作る場を一体として、マングローブ根系として定義し、潮汐や波浪により導入される流れとの相互作用について概観し考察することとする。

その根系を含むマングローブ林は様々な生態系サービスを生み出している。多くの生き物に棲み処を提供するサービス (Ellison and Farnsworth, 1992; Nagelkerken et al., 2008) の他、食料や材料の供給、海岸防護、洗掘対策、水質浄化、漁業への寄与、炭素貯留、観光などのサービスなどが挙げられている (Barbier et al., 2011)。炭素貯留に関しては、マングローブ落葉や底生微細藻類や、海流により運ばれてくる植物プランクトンや海草のデブリ等が根系に堆積することによると推察されている (Kristensen et al., 2008)。

2004年のインド洋津波以降、高潮や津波から沿岸

域を防護するサービス (Alongi, 2008; Kristensen et al., 2008; Sandilyan and Kathiresan, 2015) が注目されている。その根源は、根系と波(水粒子の流れ)の相互作用によるエネルギー減衰と考えられている (Mazda et al., 1997, 2006; Massel et al., 1999; Wolanski, 2007; Barbier, 2016; Barbier et al., 2011; Koch et al., 2009)。

本稿においては、松田(2010)がまとめた総説「マングローブ環境を支える物理過程」を参考に、マングローブ根系と流れの相互作用について、流れのスケールに着目して再整理を試みる。マングローブ根系と流れの相互作用は、流れのスケールにより分類すると、1) 1本の根を通過することにより生じる渦流れを最小単位として、2) 複数の根を通過する流れ、3) 複数のマングローブが存在する平坦なswampでの流れ、4) swampの中に2次的なcreekがあるような複合的な地形での流れ、5) R型マンガル(潮流や河川流があるcreekとswampの組み合わせの流域)での流れ、6) F型マンガル(波浪が到達する干潟・海岸とswampの組み合わせの海岸域)での流れ、7) そうしたマンガルが存在する流域や湾域全体での流れ、8) 海流が関与する広域での流れなどが考えられる。こうした流れは、林床や海底の土砂を再懸濁させ輸送し

¹⁾ 笹川平和財団海洋政策研究所 E-mail: keita@meic.jp The Ocean Policy Research Institute, The Sasakawa Peace Foundation, 1-15-16, Minato-ku, Tokyo 105-8024, Japan

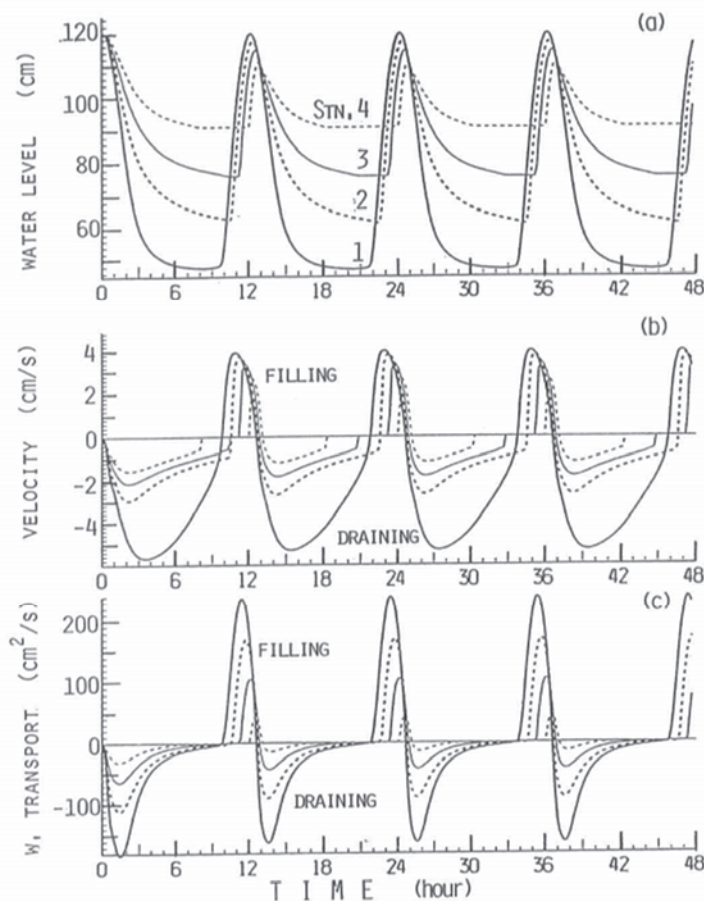


Fig.1 : Water level, velocity and discharge at a mangrove swamp. Stn.1 (a point at the creek – swamp boundary) shows higher velocity at draining tide and lower velocity at filling tide. Stn.2 – Stn.4 (inside of swamp) shows higher velocity at filling tide and lower velocity at draining tide (after Mazda et al., 1995).

地形変化を引き起こす。したがって、その計測にあたっては、流れそのものだけでなく、土砂の侵食、輸送、堆積とその結果としての地形変化により間接的に計測することが可能である。

2. マングローブ林に生じる流れ

2.1. 潮汐流

松田 (2010) がまとめているように、マングローブ域の海水流動は、地形に依存しており、特に Riverrine forest type (R 型) においては、creek を通って遡上する上げ潮、swamp への氾濫、下げ潮時に creek を通って外海へ流出するという潮汐流が卓越する (Mazda et al., 2005)。こうした潮汐流によりマングローブ林と外海が creek を通して連結されており、マングローブ林生態系と周辺の藻場・サンゴ礁生態系との重要な物質交換が行われている (Wattayakorn et al., 1990; Lacombe and Ridd, 1995)。

その際に潮汐の非対称性 (Fig. 1)、swamp への氾濫水量と樹木の抵抗に依存した浸水現象の理解が重要であることが指摘されている (Wolanski and Ridd, 1986; Ridd et al., 1990; Mazda et al., 1995, 1999)。

そうした潮汐の大切さに鑑み、マングローブ林再生においての配慮がなされ始めている。Lewis (2005) は、生態系工学的手法 (Ecological Engineering Approach) を用いて、水理学的環境、特に潮汐による海水循環の再現の重要性を説いている。Beauchard et al. (2011) は、囲われた汽水域生態系の再生における潮位差を管理することの重要性に鑑み、潮汐制限管理システム (CRT) の導入を行い、その有効性を示した。今後、放置エビ池の再生や養殖池等を利用したマングローブ林再生の際に参考となる事例と思われる。

また、今後直面する地球温暖化に伴う海面上昇の影響について、Passeri et al. (2015) は、ミシシッピ河口部のグランド湾において地形変化と海面上昇による歴史的な潮

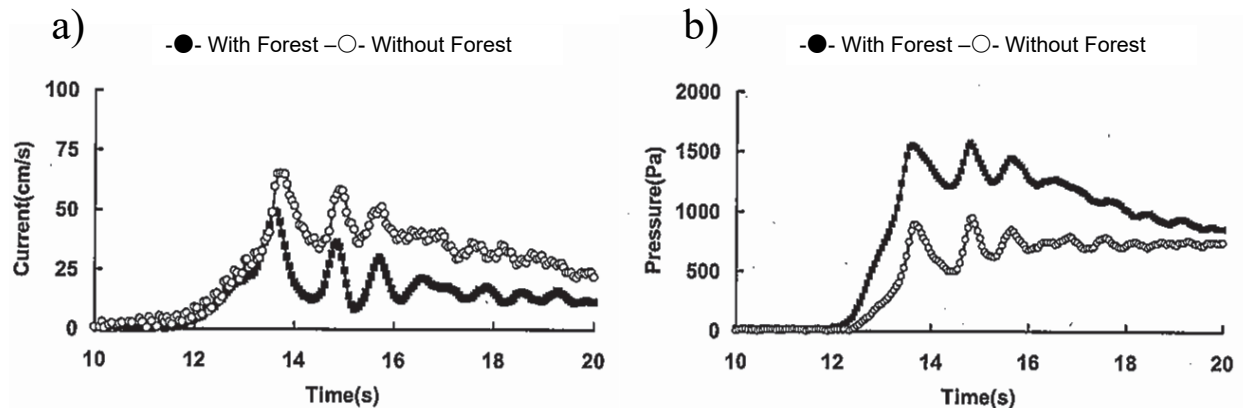


Fig.2 : Time series of a) current and b) pressure (height of tsunami) with green belt (forest model) and without green belt. a) shows current suppressed about half by existence of the green belt. b) shows wave height of tsunami which is higher in the case with the green belt, but is almost the same in the lee of the green belt (after Hiraishi and Harada, 2003).

汐の変化を計算で検証し、過去において潮流が5cm/s早かったこと、1848年当時は上げ潮優位であったが、2005年には下げ潮優位に変化したこと、こうした変化は沖合のバリアアイランドでは顕著でなく、汽水において発現したことなどを報告している。マングローブ林においては、こうした影響がより顕著に表れる可能性があることを示唆しており、今後、重点的に研究すべき領域と言える。

2.2. 波浪・津波

松田(2010)は、波浪とマングローブ林の相互作用として、波浪による海水や底泥の攪拌によるマングローブ環境への影響と、マングローブ林による波浪減衰によるマングローブ環境の安定化という2面から整理した。特にマングローブ樹木群による定量的な波浪減衰効果については、観測・計算に基づいての検討がなされており、そのエネルギー減衰率などは根系と状況(密度や空間配置、樹種など)により変化することが示されている(Mazda et al., 1997, 2006; Massel et al., 1999; Koch et al., 2009; Gedan et al., 2011; Bao, 2011)。

津波は長周期の波浪現象であり、水位上昇による静圧力とともに水粒子の運動による流れの動圧力を生じる。Hiraishi and Harada (2003)は、マングローブ林や海岸林などいわゆるグリーンベルトによる津波水位、津波流速、津波波圧の低減量を調べ、10 m四方の土地に20~30本の樹木林を育成することにより、樹木林がない場合に比較して最大津波高を半分程度に低減できることを示した(Fig. 2)。Kathiresan and Rajendran(2005)は、2004年のインド洋津波の影響を受けた18の沿岸の村の立地条件を解析し、マングローブ林による津波減災効

果を示した。一方、Kerr et al. (2006)は、Kathiresan and Rajendran (2005)の統計処理上の問題点を指摘し、Kathiresan and Rajendran (2005)において、津波減災の効果は、1) 海からの距離、2) 地盤高によって異なることや、マングローブ林などのグリーンベルトの密度と距離に大きく左右されることを確認した。また、津波遡上計算については、Bricker et al. (2015)は、植生のある領域に用いる抵抗係数(マニングの粗度係数)の見直しを既往事例から検証し、より大きな係数を用いることで計算結果が改善することを示した。

人為的影響として、creekやマングローブ林の前面を航行する船舶による引き波の影響が考えられる(Fig. 3)。環境省自然環境局・国際マングローブ生態系協会(2003)と、九州森林管理局・国際マングローブ生態系協会(2006)は、いずれも西表島の仲間川および浦内川において、引き波による根系侵食の実態を実船を用いて確かめ、引き波の規模がある範囲を超えることで引き波により再懸濁する底質が表層に達し、川の流れに乗って輸送されることで根系の侵食が進行する機構を明らかにし、航行の速度制限などの自主規制につながる情報を提供している。Awang et al. (2014)は、マレーシアのタンジュンピアイにおいて、潮流や出水、波浪の影響による海岸侵食が、船舶の引き波により助長されている状況を報告している。

2.3. 地下水

松田(2010)は表層水だけでなく、根系下の地下水流についても注意を払うべきであると指摘している。根系の底質は通常、細粒分の多い砂泥分かマングローブピートと呼ばれる泥炭であるため、透水係数が低く、地下水の



Fig. 3 : Erosion of root system at Nakama River in Iriomote Is., Japan (from top left – clockwise: a tour boat used for experiments, wake of a boat in operation, eroded root system of *Bruguiera gymnorhiza* due to boat traffic, healthy root system of *Bruguiera g.* without boat wake in the same river but on the other side of a small island in the river).

流量が小さいと考えられるため、無視されることが多い。しかし、カニ穴やトビハゼの巣などの存在 (Fig. 4) により透水係数が 10-100 倍大きくなり、土中の海水や溶存物質の透水性を高め、土質の維持に貢献していることを示した (Mazda et al., 1990; Ridd and Sam, 1996; Stieglitz et al., 2000; Susilo and Ridd, 2005)。

Donato et al. (2011) は、マングローブ林生態系における全体の炭素固定量をインド洋 - 太平洋の領域の 25 の林で推計し、1 ha あたり 1,023 mg の炭素を含み、深さ 0.5 m から 3 m までの底泥にそのほとんどが存在することを示した。このことは、炭素貯留において、地下水による物質循環に注意を払うべきであることを示唆している。Maher et al. (2013) は、潮汐による地下水流動が溶存無機炭素の系外流出に係わっていることを炭素同位体を用いた観測から示した。

Lindén and Pålsson (2013) は、ナイジェリア・オゴニ

ランドにおける観測により、流出油による地下水汚染が深刻化し、マングローブ林が影響を受けている現状を報告しており、人為的影響の伝達経路としても地下水を無視できないことが示唆されている。

3. 根系と流れの相互作用のスケールごとの整理

3.1. 1本の根を通過することにより生じる渦流れ

マングローブ根系と流れの相互作用を最も単純化すると、直立する一本の根 (もしくは幹) を 1 方向の流れが通過する状況である。例えば、コヒルギの根を通過する流れにより生じる流れを観察すると、根の背後に双子渦ができていく。流れが速くなるとこの渦が剥離し、流れに渦列が放出されるようになる。これは、カルマン渦と呼ばれ、流速と代表長さ (例えば幹の直径) の積を動粘性係数で除したレイノルズ数によって支配されている (Schlichting,

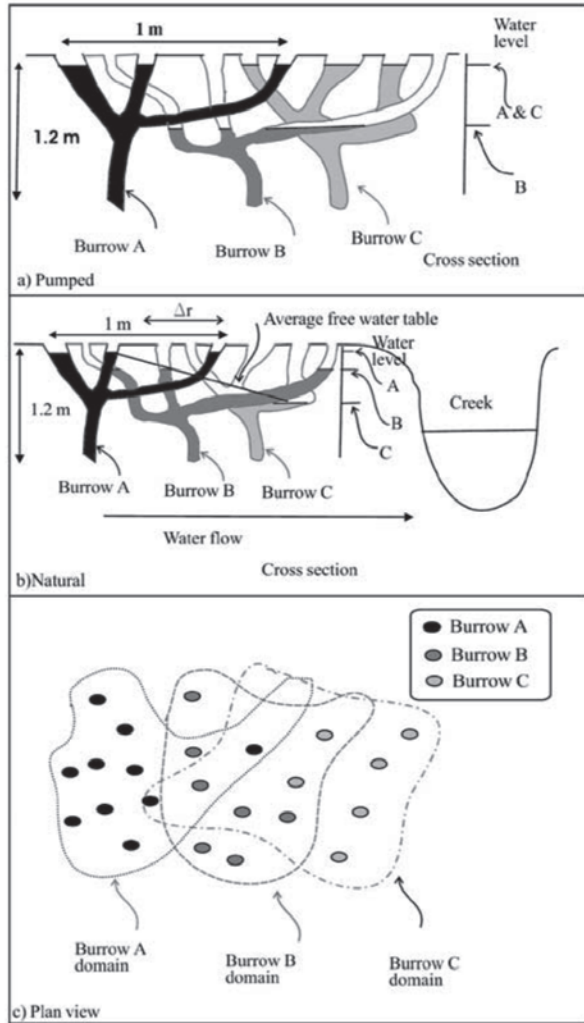


Fig. 4: Schematic diagram of crab burrows that are intermingled with, but separate from each other. (a) shows the case when a quantity of water is pumped from burrow B. (b) shows the normal relative water levels in the burrows, i.e., where the closer the burrow is to the creek, the lower the water level in the burrow. Note the burrow's size is greatly exaggerated compared with the size of the creek. (c) shows the plan view of three burrow systems that intermingle with each other (after Susilo and Ridd, 2005).

1979; 古川, 2004; Fig. 5).

Furukawa and Wolanski (1996) は、コヒルギの幹の周りの流れを画像解析による粒子追跡法で可視化した (Fig. 6a). Massell et al. (1999) では、離散渦法を用いたシミュレーションにより抗力係数 (C_d) を推定し、

$$C_d = 1.07 Re^{-0.01} \quad (1)$$

の関係式を導いた。ただし、 Re は、流速と幹の直径を用いて計算したレイノルズ数であり、200 から 80,000 の間の範囲で適用される。

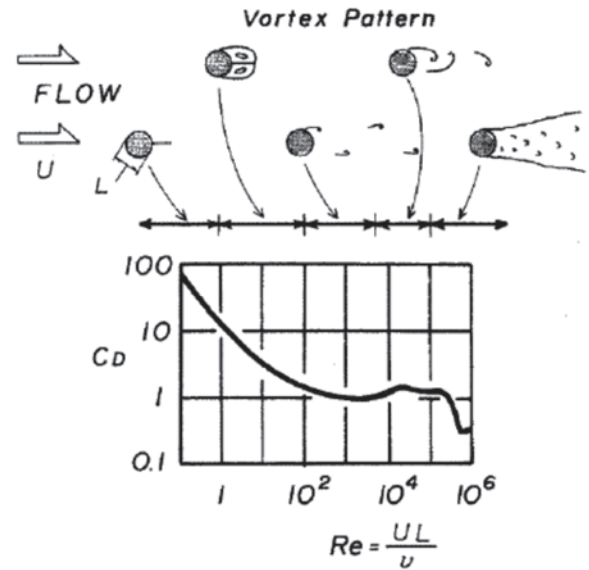


Fig. 5: Schematic image of vortex formation behind a single cylinder. The formation pattern change with Reynolds Number (古川, 2004).

3. 2. 複数の根を通過する流れ

Furukawa et al. (1997) は、オーストラリア・ケアンズのヤエヤマヒルギが優占する R 型マングローブ林において、根の周りの流れを詳細に観測し、モデル化した (Fig. 6b). Furukawa and Wosanski (1996) は、現地観測及び数値計算により、流速が小さいときは、個々の根が作る渦が互いに干渉せず、1 本の根の周りの流れと同じような様相を示しているが、流速が早くなると、カルマン渦として剝離する渦が相互に干渉し、大きな乱れと噴流状の流れと共に大きな滞留域が観測されるようになることを示した (Fig. 7). このことがセジメントの滞留時間を増やし、見かけ上堆積速度を増加させることに役立っていると考えられる。

Massell et al. (1999) は、複数の根の周りのシミュレーションを行い、 1 m^2 あたり、9 本もしくは 16 本の根が存在する場合の C_d を推定し、

$$C_d = 1.72 Re^{-0.10} \quad (2)$$

の関係式を導いた。ただし、 Re は、200 から 80,000 の間の範囲で適用される。

Zhang et al. (2015) は、こうした複雑な流れ場を模型実験により再現し、同様にヤエヤマヒルギの根系による遮へい効果と複雑な 2 次流れの存在を明らかにした (Fig. 8). 3 次元超音波流速計により、乱流エネルギーの測定も行い、乱れの原因が、後流およびせん断流にあることを示した。Zhang et al. (2015) が算定した C_d は、 Re が $2 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ の範囲において 1.8 ~ 1.2 であり、Massell et al. (1999) の示した C_d の値と同様の傾向を

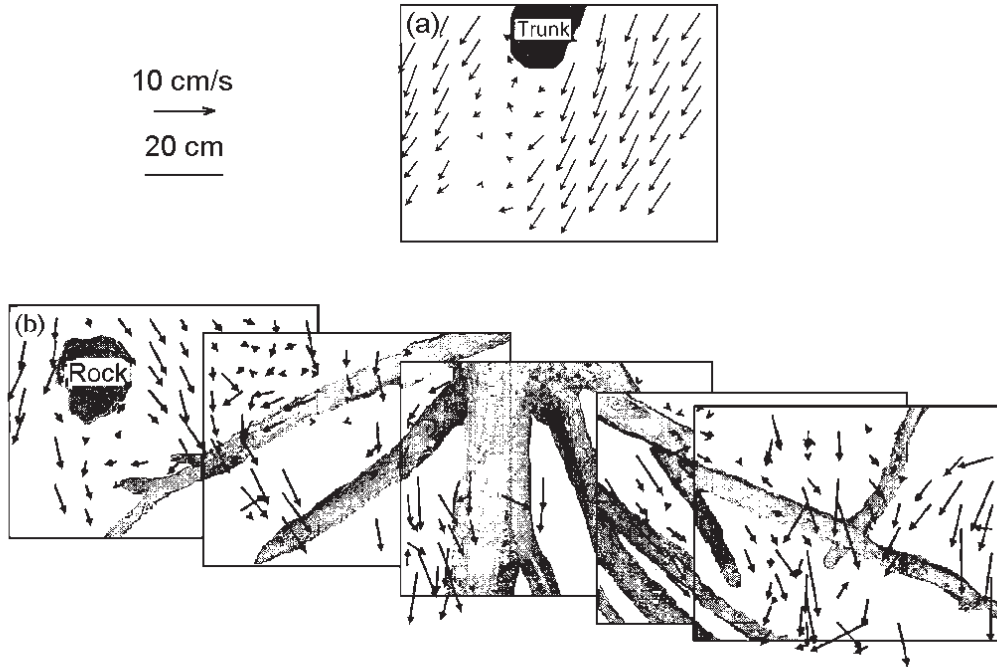


Fig. 6: Observed 1-min mean water velocities around mangroves for (a) *Ceriops* sp. and (b) *Rhizophora* sp. (Furukawa and Wolanski, 1996).

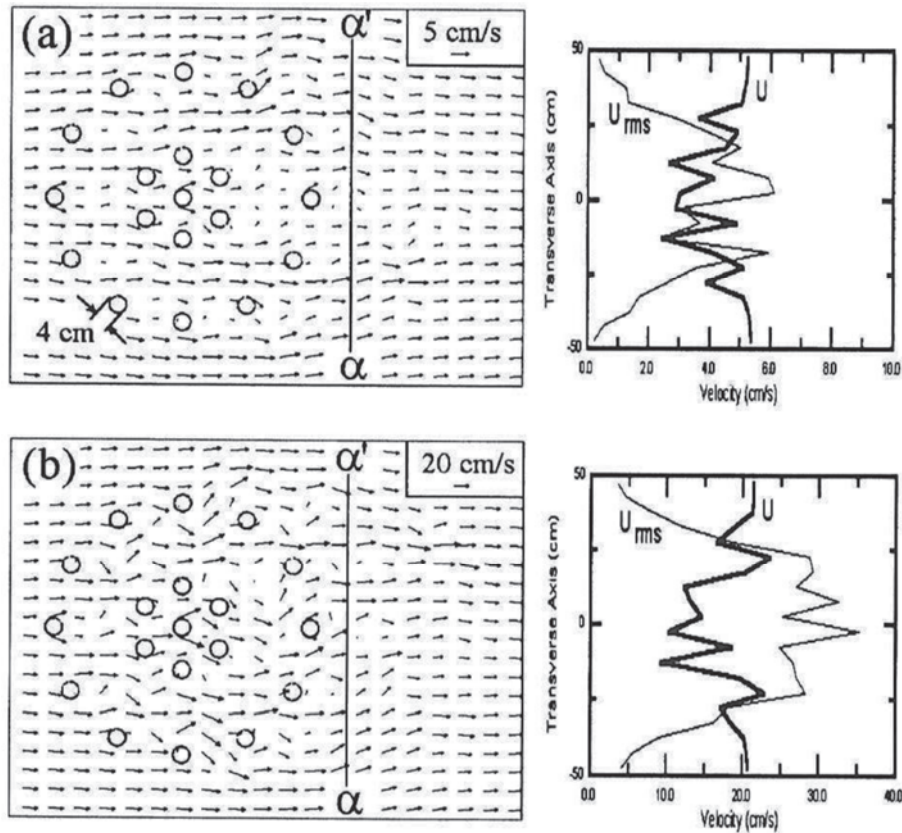


Fig. 7: Simulated velocity field around a *Rhizophora* sp. root matrix. (a) shows approach velocity of 0.05 m/s. (b) shows approach velocity of 0.2 m/s. Right figures show mean velocity U and root mean squared velocity U_{rms} at a cross-sectional line $\alpha-\alpha'$ shown in the left figure. Note the stagnation zones and the jets interacting with one another in (b) (Furukawa and Wolanski, 1996).

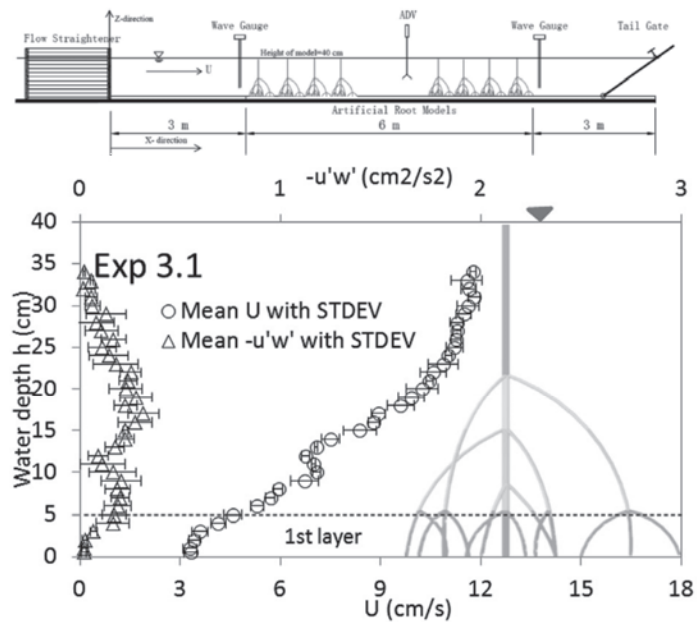


Fig. 8: Top figure shows laboratory experiments conducted for a 6-m stretch of an artificial prop root model array fitted into a 12-m long glass recirculating tilting flume. Bottom figure shows an example of averaged mean stream-wise velocity U and Reynolds stress/density $-u'w'$ profiles (after Zhang, 2015).

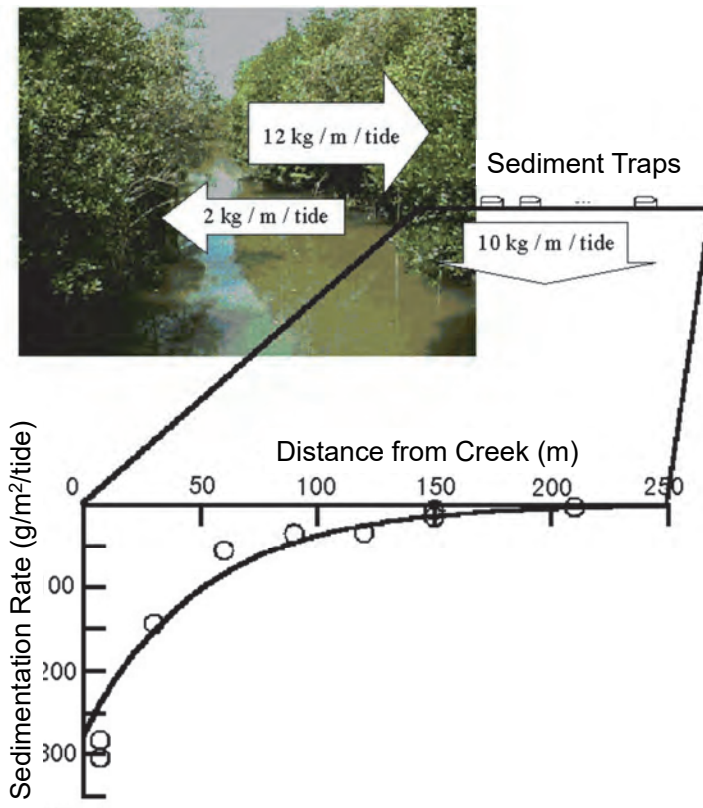


Fig. 9: Sediment transport between creek and mangrove swamp. Imported sediment has been trapped by sediment traps, and interpreted as sedimentation rate. The integrated sedimentation (10 kg/m/tide) observed by sediment traps on the forest floor matched with the difference between imported sediment (12 kg/m/tide) and exported sediment (2 kg/m/tide) observed at the boundary of creek and mangrove swamp (Furukawa et al. 1997).



Fig. 10: Eroded forests at Ponpei Is., Federal States of Micronesia. Left photo shows exposed knee root system of *Bruguiera* sp. at low tide. Almost all roots of 50 cm height are exposed. Right photo shows submerged knee root system at high tide. Turbid water shows high sediment transport.

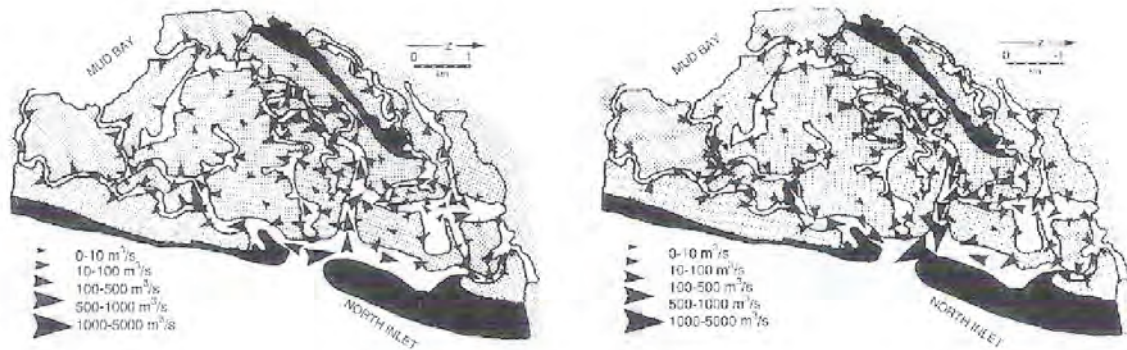


Fig. 11: Simulated distribution of flow in the North Inlet estuary - marsh system in South Carolina, USA. Left figure shows a flow pattern at high tide. Right figure shows a flow pattern at 3 lunar hours after high tide (after Kjerfve et al., 1991).

示した。

3. 3. 複数のマングローブが存在する平坦な swamp での流れ

こうしたマングローブが林立する swamp においては、根系が抵抗となり、潮流が非対称となることは、前述した。そうした効果によりセジメントの堆積が促進される。Furukawa et al. (1997) は、creek からの距離に従って減る堆積量をセジメントトラップ法で観測し、混合型の沈砂池における堆積量を推計する自然対数式にあてはめ、swamp 全体での堆積量を推計した (1 潮汐, creek1m 幅当り 10 kg)。その値が creek から流入・流出するセジメントフラックスを測定し計算した結果 (流入 12 kg, 流出 2 kg) と整合することを確認した (Fig. 9)。

Wolanski(1995) は、こうした物理的な堆積機構以外に、化学的反応により緩やかに連結し見かけ上密度が減少して浮遊していたフロックが崩壊すること、微生物が粘土粒子に取りつくこと等による生物学的な効果が発揮されること等が堆積を促進する効果として働くことを示唆している。

Swamp は通常堆積傾向にある場であるが、侵食が進むマングローブ林が見られている。多くは、波浪の影響によるものであるが、ミクロネシア連邦のポンペイ島では、潮汐流が支配的なオヒルギ、ハウガンヒルギが卓越する林分で、顕著な侵食が観測されている (Fig. 10)。地球温暖化に伴う海面上昇の影響が懸念されているが、まだその詳細なメカニズムは解明されていない。

3. 4. swamp の中に 2 次的な creek があるような複合的な地形での流れ

Kjerfve et al. (1991) は、米国南カロライナの複数の creek が流れる汽水域を詳細にモデル化し、植生による流れの変化、高潮時におけるシートフロー状の流れが swamp を横断すること等を示した (Fig. 11)。Nihei et al. (2002) は、石垣島吹通川流域の詳細な観測により、同様の流れの変化を捉えるとともに、温度フラックスを測定することで creek からの熱が、流れに移送され swamp の林床に到達していることも発見した。

Creek の中では、その流路の曲がりがあると表層で外

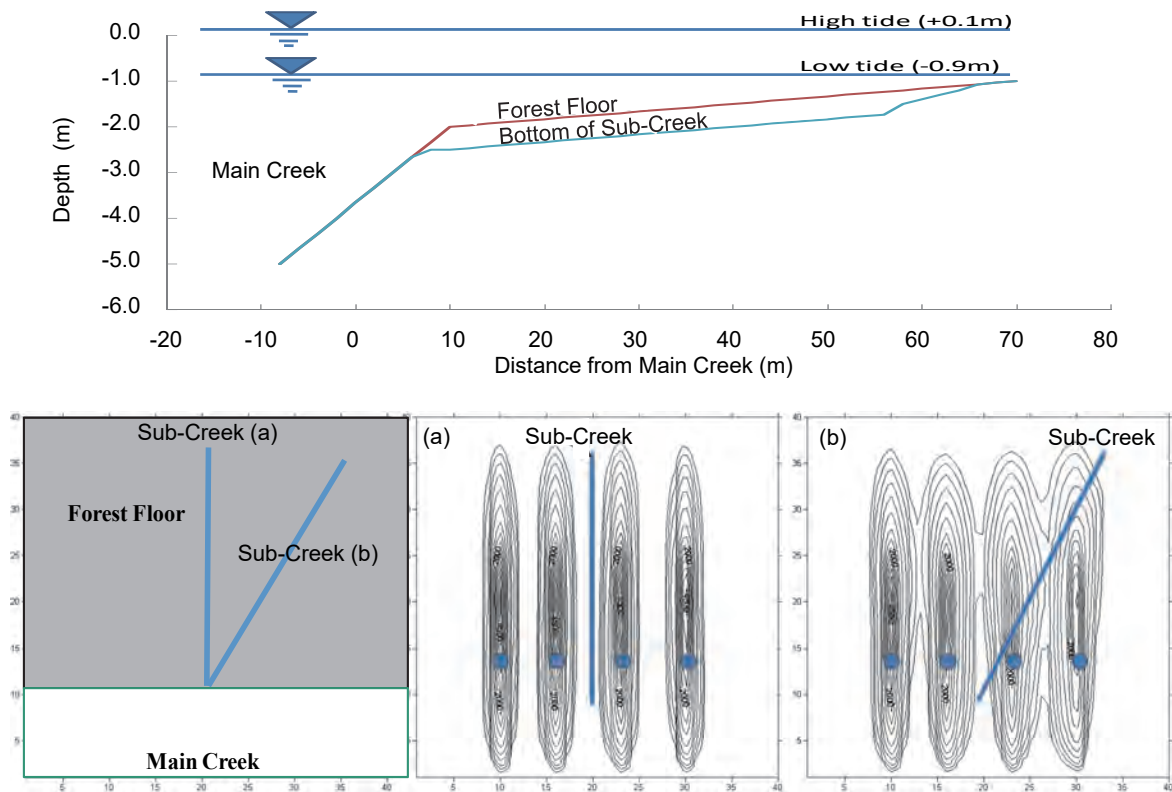


Fig. 12: Simulated sub-creek effects on material transport. Injected passive tracer has been tracked for 2 tidal cycles and plotted. Top and bottom left figures show calculation domain. (a) shows sediment transport in a case with sub-creeks perpendicular to a main creek. (b) shows that with sub-creeks oblique to the main creek (after Furukawa, 2009).

側に、底層で内側に向かう流れが生じ、らせん流となる。そうした微細な流れ構造が局所的な洗堀・堆積を促進し、より複雑な流れとセジメント輸送の様相が生じる。古川 (2009) は、swamp の中に 2 次的な creek が無い場合、主 creek に対して直角にある場合、斜めに存在する場合を比較し、2 次的な creek により swamp 内の流速成分が増加し物質交換が促進されている可能性を示すとともに、その効果は 2 次的な creek が主 creek に対して斜めになっていた方が高いことを示唆した (Fig. 12)。

Michot et al. (2011), 米国フロリダ湾のエバーグレイドマングローブ生態遷移場 (Everglades Mangrove Ecotone Region: EMER) の一部をなすテイラー湿地において、MIKE-FLOOD (DHI, <http://dhigroup.com/>) を用いて、地下水、池、creek、swamp のモデル化を行い、年間を通しての水循環を計算した。河口部における流量が良好に再現されているが、降水時にシートフロー状に地表を流れる現象がモデルに取り込めていないなどの問題点も指摘された。複雑な地形条件の計算ができるようになってきている一方で、それを校正する現地データが

不足していることが問題となっている。

3.5. R 型マングルでの流れ

R 型マングルとは、潮流や河川流がある creek と swamp が組み合わさった流域である。Swamp における主な流れの特徴は 2.1 潮汐流の節で紹介した。本節では、creek の流れについて重点的に解説する。

Creek においては、海からの海水と上流からの淡水が合わさり、濁度極大域 (turbidity maximum zone) や塩分の極大域を形成するとともに、swamp への浸水、swamp からの流入を繰り返すことで creek の流路方向の分散が大きくなる傾向がある (Wolanski, 1986; Wolanski and Ridd, 1986; Wolanski, 1992; Wolanski and Spagnol 2003)。

Mazda et al. (1995) では、creek の入口において上げ潮時と下げ潮時で流速が非対称となる機構が理論的に説明されている。すなわち、creek の入口での流速 u は、creek の水深 H と creek 長 L で計算される creek 内の水量変化と、swamp 内への浸水面積 A による水量変化の

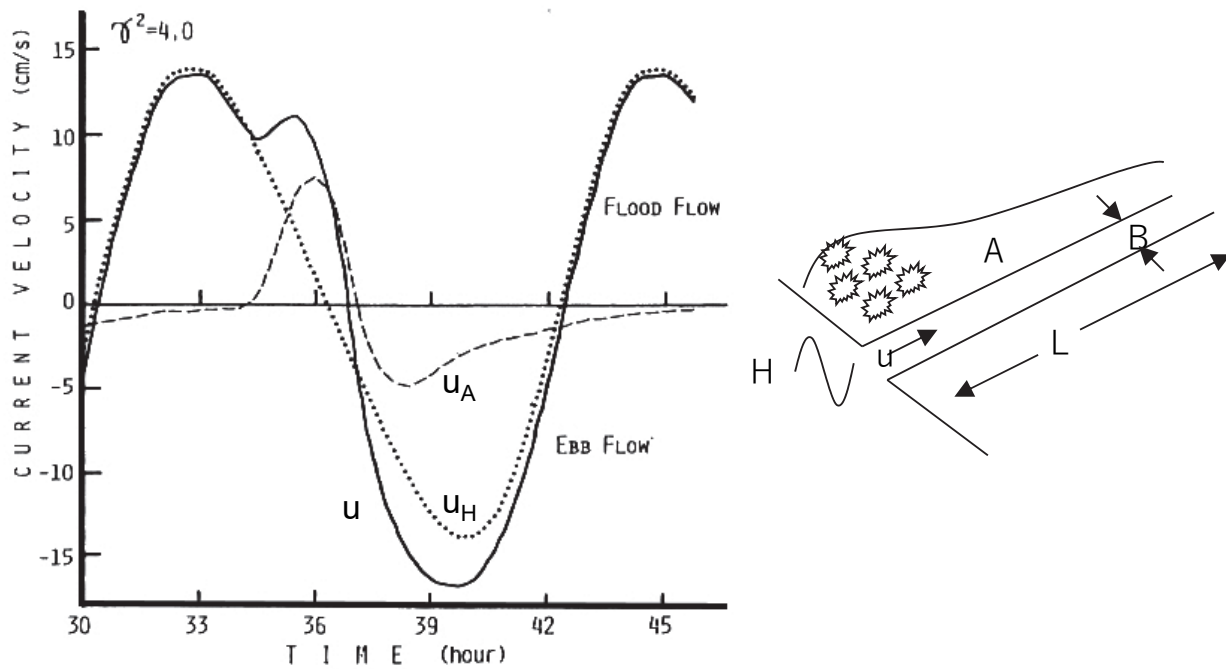


Fig. 13: Velocity at the mouth of a model creek. u_H is a tidal current velocity component due to the creek, and u_A is a component due to the swamp. (after Mazda et al., 1985). See Eq.(3) in the text

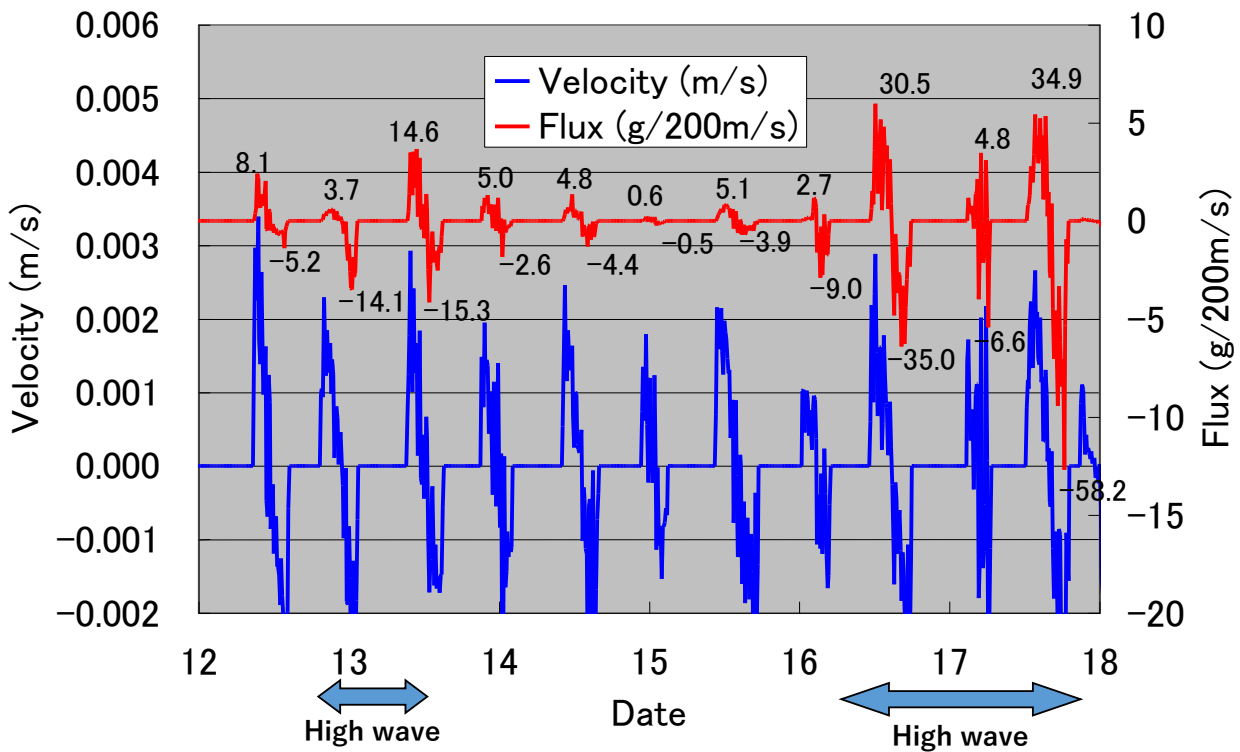


Fig. 14: Observed sediment transport at F-type mangal at Nadara River, Iriomote Is., Japan. Velocity is calculated by water level change (see Eq.(4) in the text). Plus flux represents sediment transport from sea to land (sedimentation), and minus flux represents sediment transport from land to sea (erosion) (after Furukawa et al., 2002).

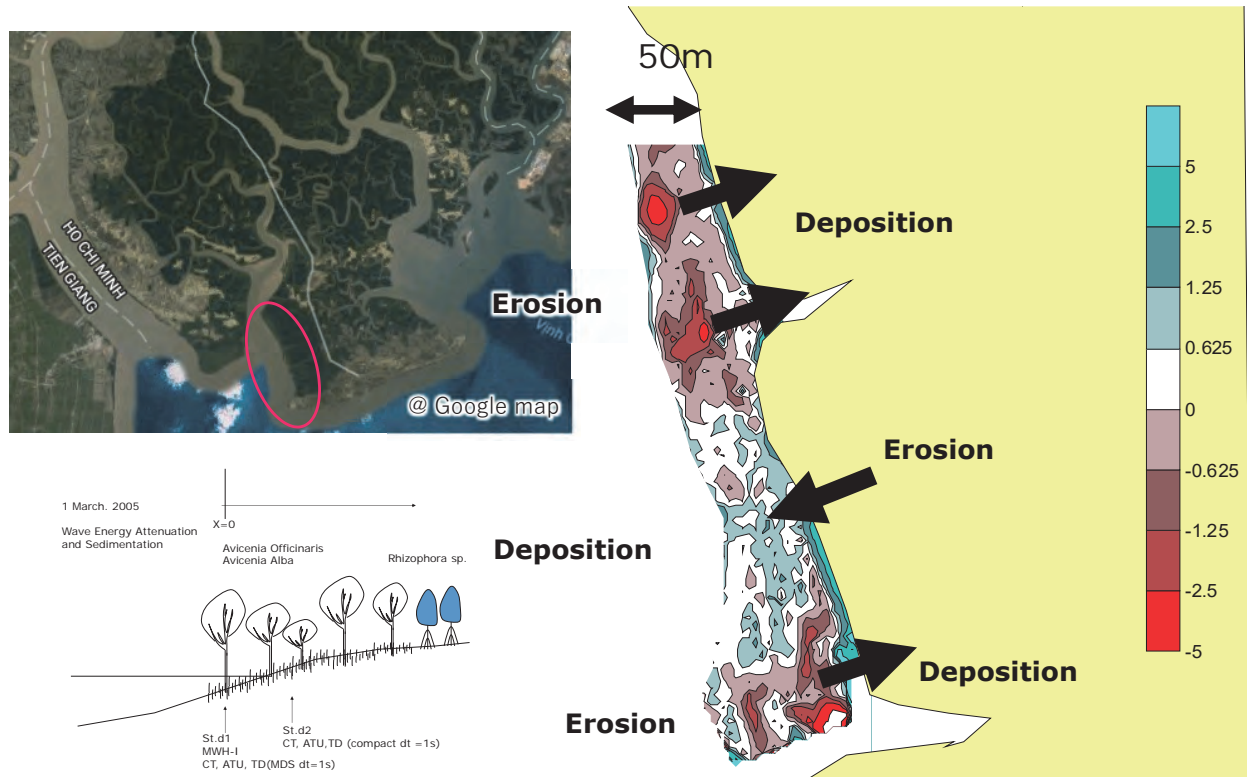


Fig. 15: Can Gio Mangrove Reserve. Observation of sediment transport between a tidal flat and a F-type mangrove forest. Top Left figure shows location (by Google map), Right figure shows anomaly of bottom topography and direction of sediment transport. Arrow length is qualitatively described. Bottom Left figure shows location of observation (Furukawa unpublished data).

効果を合わせたものとなる。

$$u = \frac{L}{H} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{HB} \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3)$$

ここに、 B は creek の幅である。式 (3) の右辺 2 項を u_H , u_A として別々に作図すると、 u_H は上げ潮下げ潮時ともに、ほぼ同じ流速を持ち、 u_A は上げ潮時の方が早い流速となる (swamp における潮汐の非対称性)。この 2 項を足した u は、下げ潮時の方が早い流速となる (Fig. 13)。この非対称性が creek 内の土砂閉塞を防いでいるのではないかと見られている (Bunt and Wolanski, 1980)。

3. 6. F 型マングルでの流れ

F 型マングルとは、波浪が到達する干潟・海岸と swamp が組み合わさった海岸域のマングローブ林を示す。多くは、パイオニア種であるマヤブシキヤヒルギダマシなどが優占する。

海岸線に沿った単位長さ当たりで、潮汐によって F 型マングルに浸入する水量 Q は、海面が水平と仮定すると、流速 u と水深 H ならびに地形勾配 i によって

$$Q = u \cdot H = \frac{1}{i} \cdot \frac{dH}{dt} \cdot H \quad (4)$$

と推定できる。したがって、水位と濁度を連続的に測定することで、F 型マングルへのセジメント輸送が観測できることになる。古川ら (2002) は、西表島のナガラ川河口の F 型マングルで観測を行い、波浪の高低によってセジメント輸送の形態が変わることが示唆された (Fig. 14)。すなわち、波浪が弱いときは波に誘起される非対称性の流れであるストークス輸送により堆積傾向にあり、波浪が高いときには、林内での再懸濁が生じ、侵食傾向となるようである。このことから、波浪の制御が F 型マングルの侵食対策として有効であることが推察される。

ベトナムのカンザー生物圏保護区において、国土技術政策総合研究所はベトナム科学大学との共同観測を行い、侵食傾向にあるという海岸線の海底地形を 2 年間にわたってモニタリングするとともに、海岸線の数か所でセジメントフラックスの計測を行った (未発表)。その結果、正味のセジメントの流出のあるマングローブ林の前面干潟部では、水深が浅くなる堆積傾向にあり、正味のセジメントの捕捉のあるマングローブ林の前面干潟部では、水深が深

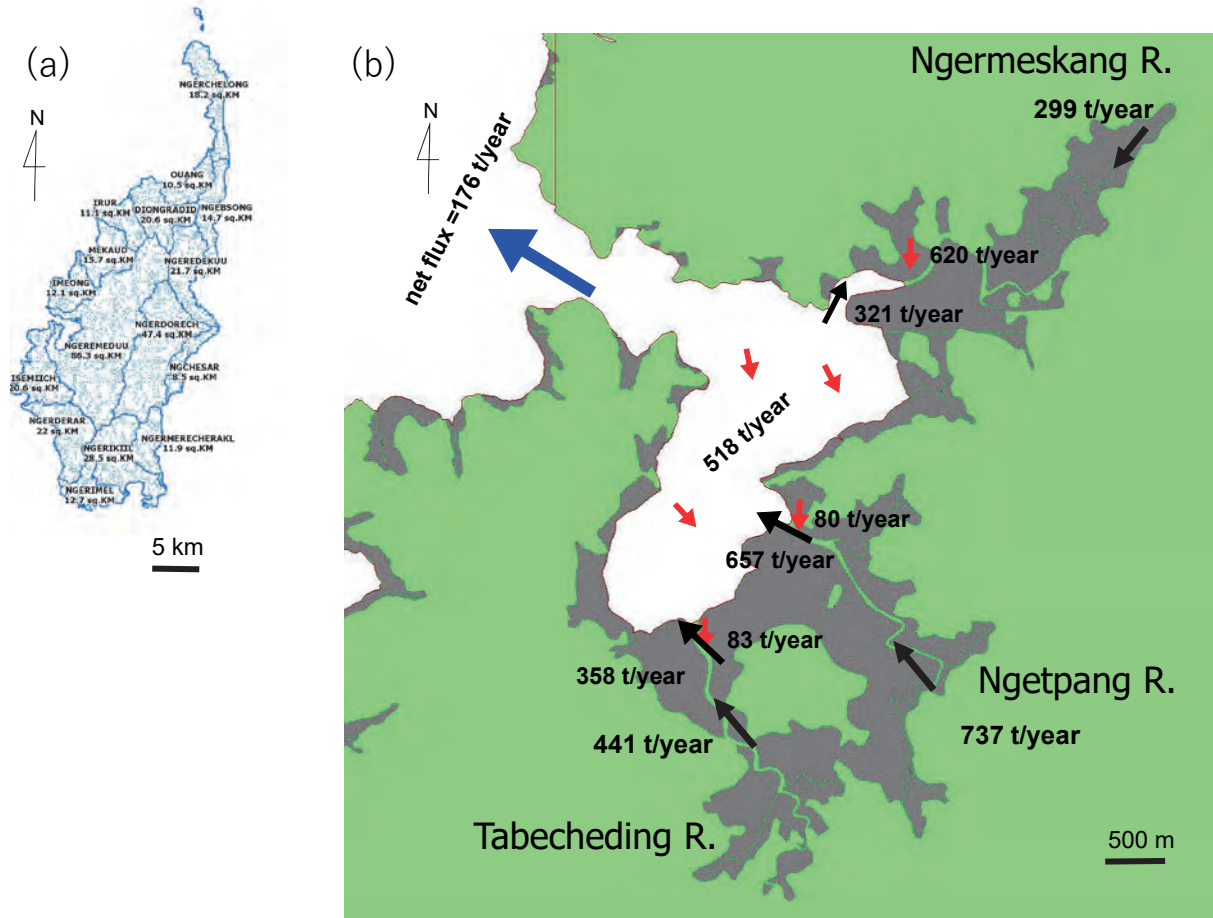


Fig. 16: Schematic images of (a) watershed in Babeldaob Island, Palau and (b) sediment transport from three rivers to the sea in Ngeremeduu Bay. Sedimentation rates were estimated by observation and simulation. (after Victor, 2007).

くなる侵食傾向にあることが分かった。F型マンガルの多くは、前面干潟とともに立地していることが多いことを勘案すると、F型マンガルにおける底質は、ダイナミックに前面の干潟部と林内を行き来している可能性が示唆される (Fig. 15)。

3. 7. マンガルが存在する流域や湾域全体での流れ

Victor (2007) は、パラオのバベルダオブ島にあるネレメドゥ湾にそそぐ3つの川とその流域にあるマングローブ林でのセジメント輸送、堆積速度の推定、湾口部でのセジメントフラックス計測、海底地形の測量などを実施し、湾内のセジメント輸送状況を推定した (Fig. 16)。南側の2つの河川、特にNgetpang川の土砂供給量が大きいのは、島に周回道路を整備中であり、工事や伐採などによる土砂流出の影響を受けていると想定される。この2つの河川の河口部には比較的トラップ量の少ない (安定した) マングローブ林と前面の干潟が発達していた。一方、

北のNgermeskang川の河口部では、若いヤエヤマヒルギが稠密に生育しており、大きなトラップ量を見せ、川からの供給だけでなく湾内のセジメントのシンクになっていることが示唆された。湾外への流出は少なく、その差として湾内に堆積するセジメントが500t/年を超えることが推定された。こうした状況をモニタリングし評価することで、その生態系の管理の方針が見えてくる。

3. 8. 海流が関与する広域での流れ

さらに広い視野から島嶼の周りの海流・波とマングローブ林・干潟・サンゴ礁の相互作用を見ることで、生態系の繋がりが俯瞰できる。Mesaki (1995) は、サンゴ礁周辺の海域を波の強さ、基盤の広がりなどをもとに、Reef, Reef-Lagoon, Lagoonと分類した。マングローブ林や干潟は、主に波の影響が少なく基盤が広がるLagoonタイプの場に存在することが多い。マングローブ林や干潟が波力によるかく乱に弱い生態系であり、サンゴ礁などによる

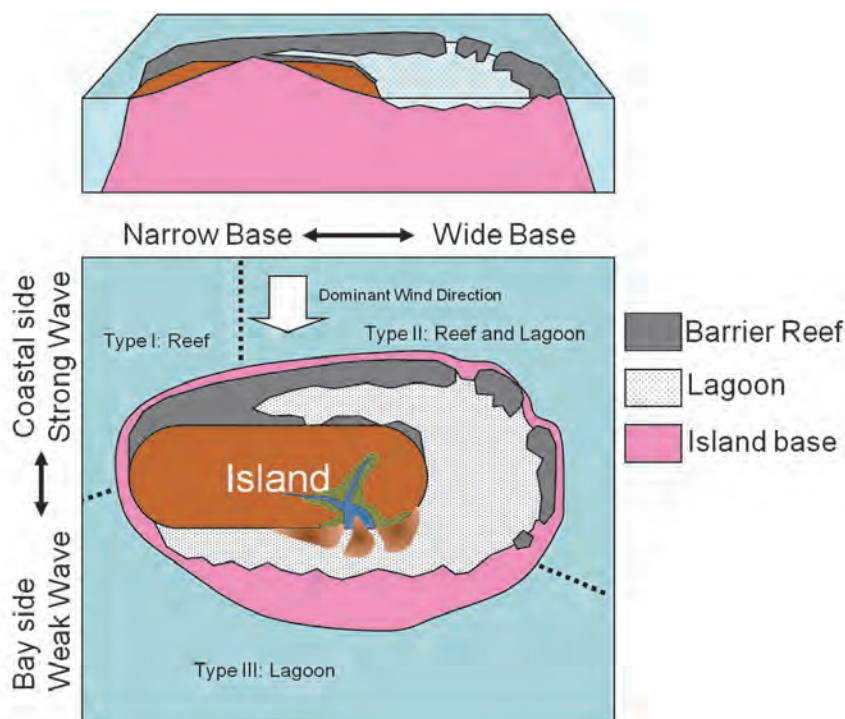


Fig. 17: Schematic image of linked ecosystems (mangrove forests, lagoons and coral reefs). Dominant wave direction effects on forming different habitat types around reef-type, reef and lagoon-type and lagoon-type islands (after Masaki, 1995).

波浪の低減効果などがその存在に不可欠であることが推定される (Fig. 17).

4. おわりに

地域においては、昔からマングローブ林の多面的な機能が経験的に知られており、劣化したマングローブ林の再生事業がコミュニティレベルで実施されている事例がある。フィリピン Pedada 湾においては、季節的な高波浪が原因とみられる侵食により失われた *Avicenia marina* を中心とする F 型マングローブ林を再生し、海岸保全ならびに、生態公園の構築を目指した再生活動が ZSL-CMRP (ロンドン生物学会、コミュニティベースマングローブ再生プログラム) の元、展開されている (Fig. 18)。ZSL-CMRP チームによる事前の踏査および、地元の体験的情報から、高波浪を防波堤により防ぐことが有効と判断され、専門コンサルタントにより高さ 1.2 m (HWL+0.3 m)、天端幅 1.5 m、の防波堤 2 本 (延長 80 m と 120 m) の蛇かごに石を詰めた Gabion タイプの構造が提案された。こうした情報が PO (People Organization: 地域協議会) および、MLGU (Municipal Local Government Unit: 地方自治体) と共有され、話し合いがもたれた結果、現地で入手可能な小

石などを材料として、防波堤を小型化し、高さを 0.8 m 程度に減じる再設計案が合意された。防波堤は PO メンバーを中心とする地元労働者らにより施行され、2010 年 1 月に完成した。その後、同年 3 月から 9 月までの間、7 回に分け、総数 1306 株の *A. marina* の移植が行われた。しかし、2011 年 3 月の訪問当時の残存率は 0% であった。

著者が現地に専門家として入り、地形測量を実施した結果、植林した地盤高が周囲の生息限界である LWL+0.75 m に 30-50 cm 程度足りていないことが、植林の失敗の原因と判断された。しかし、地形測量結果からは、年 10 cm 程度の堆積が起こっていた。これは、湾内の季節的な風による沿岸方向の漂砂があり、それを防波堤が効率的にトラップし、一定の海岸保全効果が発揮されているものと考えられた。そこで、持続的な再生の推進のために、この堆積傾向を継続的に把握することを PO の管理スキームに追加することを提案し、堆積状況を見ながら適地に植林していく戦略をとることとなった。その後、2014 年には防波堤背後に *A. marina* が活着し、台風時にも耐えられるだけの林が再生した。

マングローブ根系と流れの相互作用を理解することで、短期的な観測から長期的な変化の傾向を推定することができる。地球温暖化による環境変化への適応、生態系を

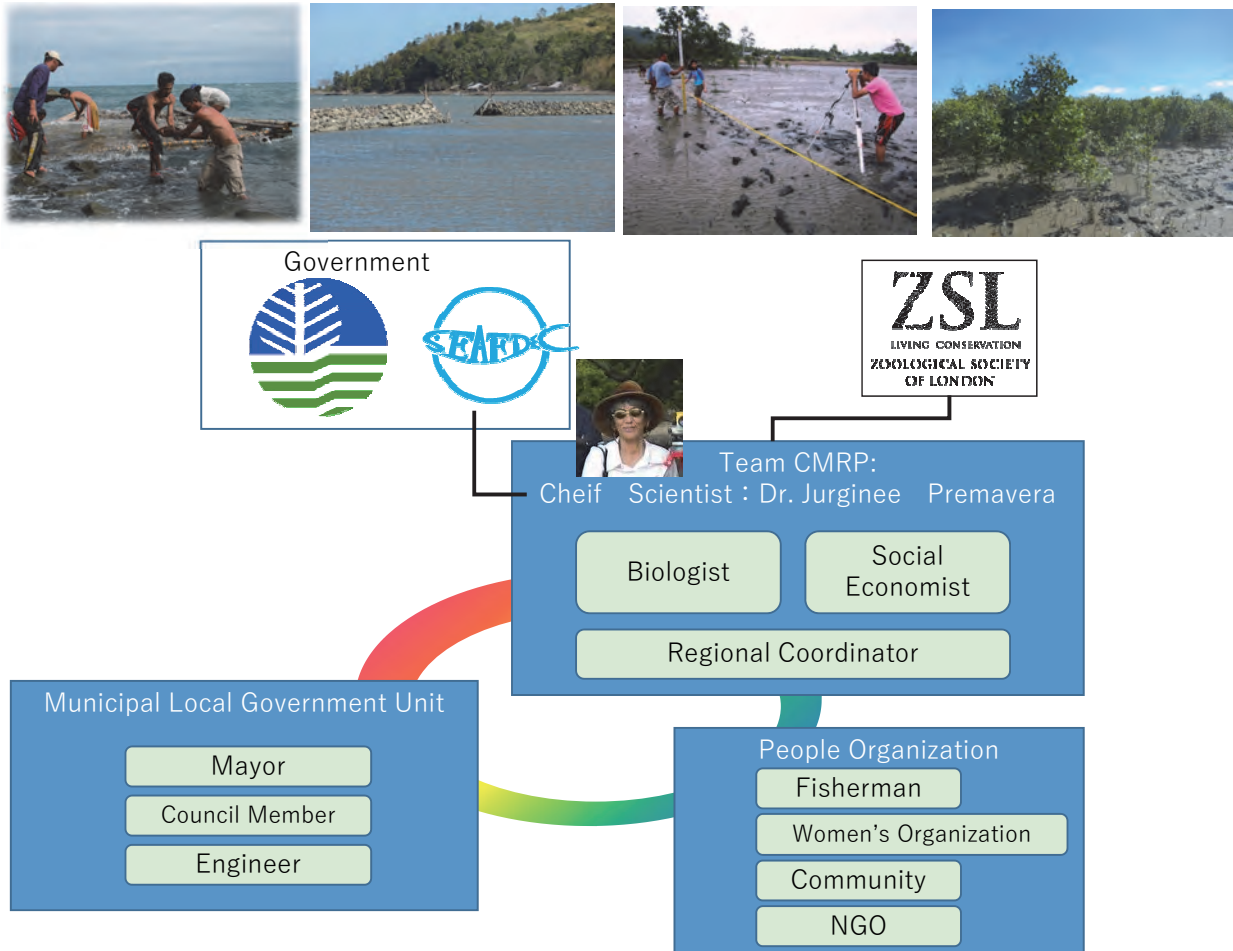


Fig. 18: Community Based Mangrove Rehabilitation Project (CMRP). Top figures (from left to right) show material preparation by local fishermen, constructed break waters, monitoring of topography by local community, and restored mangroves, Bottom: shows governance of CMRP.

利用した防災機能の発揮，持続可能な開発と保全，利用を実現するためのツールとして，こうした物理過程の理解に基づくモニタリングや順応的な管理は不可欠と考える。

謝辞

本稿のとりまとめにあたり，日本マングローブ学会編集委員会委員藤本潔先生に大変お世話になりましたこと，また，2名の匿名の査読者によって詳細な確認・ご指摘をいただきましたことお礼申し上げます。さらに，本稿をまとめるにあたり，松田義弘先生の執筆された松田 (2010) を細部にわたり参考にさせていただきました。マングローブ林における物理過程の先駆者としての業績に敬意を表し，後続の関連研究の発展を祈念いたします。

引用文献

- Alongi, D.M. (2008) : Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76: 1-13.
- Awang, N.A., Jusoh, W.H.W. and Hamid, M.R.A.(2014) : Coastal erosion at Tanjong Piai, Johor, Malaysia. *Journal of Coastal Research* 71: 122-130.
- Bao, T.Q. (2011) : Effect of mangrove forest structures on wave attenuation in coastal Vietnam. *Oceanologia* 53: 807-818.
- Barbier, E.B. (2016) : The protective service of mangrove ecosystems: A review of valuation methods. *Marine Pollution Bulletin* 109: 676-681.
- Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E.W.,

- Stier, A.C. and Silliman, B.R. (2011) : The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs* 81: 169-193.
- Beauchard, O., Jacobs, S., Cox, T.J.S., Maris, T., Vrebos, D., Van Braeckel, A. and Meire, P. (2011) : A new technique for tidal habitat restoration: Evaluation of its hydrological potentials. *Ecological Engineering* 37: 1849-1858.
- Bricker, J.D., Gibson, S., Takagi, H. and Imamura, F. (2015) : On the need for larger Manning's roughness coefficients in depth-integrated tsunami inundation models. *Coastal Engineering Journal* DOI: 10.1142/S0578563415500059.
- Bunt, J.S. and Wolanski, E. (1980) : Hydraulics and sediment transport in a creek - mangrove swamp system. In *Proc. 7th Australian Conf. on Hydraulics & Fluid Mechanics*. pp 492-495.
- Donato, D.C., Kauffman, J.B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. and Kanninen, M. (2011) : Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience* 4: 293-297.
- Ellison, A.M. and Farnsworth, E.J. (1992) : The ecology of Belizean mangrove-root fouling communities: patterns of epibiont distribution and abundance, and effects on root growth. *Hydrobiologia* 247: 87-98.
- Fujimoto, K. and Miyagi, T. (1993) : Development process of tidal-flat type mangrove habitats and their zonation in the Pacific Ocean. *Vegetatio* 106: 137-146.
- 古川恵太 (2004) : 離散渦法による沿岸域流れの解析に関する研究. 早稲田大学博士論文.
- 古川恵太 (2009) : 潮汐によるマングローブ林の水循環における2次creekの役割. 2009年度日本マングローブ学会年次大会講演集.
- 古川恵太・馬場繁幸・宮城豊彦 (2002) : マングローブ林における短期的砂泥輸送形態の変化について. 2002年度日本マングローブ学会年次大会講演集.
- Furukawa, K. and Wolanski, E. (1996) : Sedimentation in Mangrove Forests. *Mangroves and Salt Marshes* 1: 3-10.
- Furukawa, K., Wolanski, E. and Mueller, H. (1997) : Currents and sediment transport in mangrove forests. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 44: 301-310.
- Gedan, K.B., Kirwan, M.L., Wolanski, E., Barbier, E.B. and Silliman, B.R. (2011) : The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Climate Change* 106: 7-29.
- Hiraishi, T. and Harada, K. (2003) : Greenbelt tsunami prevention in South-Pacific Region. *Report of the Port and Airport Research Institute* 42 (2) : 1-23.
- Kathiresan, K. and Rajendran, N. (2005) : Coastal mangrove forests mitigated tsunami. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65: 601-606.
- 環境省自然環境局・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』 p.25.
- Kerr, A.M., Baird, A.H. and Campbell, S.J. (2006) : Comments on 'Coastal mangrove forests mitigated tsunami' by K. Kathiresan and N. Rajendran [Estuar. Coast. Shelf Sci. 65 (2005) 601-606]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 67: 539-541.
- Kjerfve, B., Miranda, L.B. and Wolanski, E. (1991) : Modelling water circulation in an estuary and intertidal salt marsh system. *Netherlands Journal of Sea Research* 28: 141-147.
- Koch, E.W., Barbier, E.B., Silliman, B.R., Reed, D.J., Perillo, G.M.E., Hacker, S.D., Granek, E.F., Primavera, J.H., Muthiga, N., Polasky, S., Halpern, B.S., Kennedy, C.J., Kappel, C.V. and Wolanski, E. (2009) : Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7: 29-37.
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T. and Marchand, C. (2008) : Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany* 89: 201-219.
- 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』 p.70.
- Larcombe, P. and Ridd, P.V. (1995) : Megaripple dynamics and sediment transport in a mesotidal mangrove creek: implications for palaeoflow reconstructions. *Sedimentology* 42: 593-606.
- Lewis, III R.R. (2005) : Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecological Engineering* 24: 403-418.
- Lindén O. and Pålsson J. (2013) : Oil contamination in ogoniland, Niger delta. *Ambio* 42: 685-701.
- Maher, D.T., Santos, I.R., Golsby-Smith, L., Gleeson, J. and Eyre, B.D. (2013) : Groundwater-derived

- dissolved inorganic and organic carbon exports from a mangrove tidal creek: The missing mangrove carbon sink? *Limnology and Oceanography* 58: 475-488.
- Massel, S. R., Furukawa, K. and Brinkman, R. M.(1999): Surface wave propagation in mangrove forests. *Fluid Dynamics Research* 24: 219-249.
- 松田義弘 (2010) : マングローブ環境を支える物理過程. *Mangrove Science* 7: 19-28.
- Mazda, Y., Kanazawa, N. and Kurokawa, T. (1999) : Dependence of dispersion on vegetation density in a tidal creek-mangrove swamp system. *Mangroves and Salt Marshes* 3: 59-66.
- Mazda, Y., Kanazawa, N. and Wolanski, E. (1995) : Tidal asymmetry in mangrove creeks. *Hydrobiologia* 295: 51-58.
- Mazda, Y., Kobashi, D. and Okada, S., (2005) : Tidal-scale hydrodynamics within mangrove swamps. *Wetlands Ecology and Management* 13: 647-655.
- Mazda, Y., Magi, M., Ikeda, Y., Kurokawa, T. and Asano, T. (2006) : Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp. *Wetlands Ecology and Management* 14: 365-378.
- Mazda, Y., Magi, M., Kogo, M. and Hong, P. N. (1997) : Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King Delta, Vietnam. *Mangroves and Salt Marshes* 1: 127-135.
- Mazda, Y., Yokochi, H. and Sato, Y. (1990) : 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.
- Mesaki, S. (1995) : Origin of coral reef. *WWF Nature Series 2, Coral Reef in Shiraho*. WWF Japan: 1-48.
- Michot, B., Meselhe, E.A., Rivera-Monroy, V.H., Coronado-Molina, C. and Twilley, R.R. (2011) : A tidal creek water budget: Estimation of groundwater discharge and overland flow using hydrologic modeling in the Southern Everglades. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 93: 438-448.
- Nagelkerken, I., Blaber, S.J.M., Bouillon, S., Green, P., Haywood, M., Kirton, L.G., Meynecke, J.-O., Pawlik, J., Penrose, H.M., Sasekumar, A. and Somerfield, P.J. (2008) : The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany* 89: 155-185.
- Nihei, Y., Nadaoka, K., Aoki, Y., Wakaki, K., Yai, H. and Furukawa, K. (2002) : An Intensive Field Survey of Physical Environments in a Mangrove Forest. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference* 12: 357-361.
- Passeri, D.L., Hagen, S.C., Medeiros, S.C. and Bilskie, M.V., (2015) : Impacts of historic morphology and sea level rise on tidal hydrodynamics in a microtidal estuary (Grand Bay, Mississippi) . *Continental Shelf Research* 111: 150-158.
- Ridd, P.V. and Sam, R. (1996) : Profiling groundwater salt concentrations in mangrove swamps and tropical salt flats. *Estuarine, Coastal Shelf Science* 43: 627-635.
- Sandilyan, S. and Kathiresan, K. (2015) : Mangroves as bioshields: an undisputed fact. *Ocean Coast. Management* 103: 94-96.
- Schlichting, H. (1979) : *Boundary layer theory*. McGraw-Hill Book Co.
- Stieglitz, T., Ridd, P.V. and Muller, P. (2000) : Passive irrigation and functional morphology of crustacean burrows in a tropical mangrove swamps. *Hydrobiologia* 421: 69-76.
- Susilo, A. and Ridd, P.V. (2005) : The bulk hydraulic conductivity of mangrove soil perforated with animal burrows. *Wetlands Ecology and Management* 13: 123-133.
- Victor, S. (2007) : Effects of sedimentation on Palau's coral reefs. In Kayanne, H., Omori, M., Fabricius, K., Verheij, E., Colin, P., Golbuu, Y. and Yukihiro, H. (eds.) *Coral Reefs of Palau*. Palau International Coral Reef Center, Palau, pp 112-122.
- Wattayakorn, G., Wolanski, E. and Kjerfve, B. (1990) : Mixing, trapping and outwelling in the Klong Ngao mangrove swamp, Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 31: 667- 688.
- Wolanski, E. (1986) : An evaporation-driven salinity maximum zone in Australian tropical estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 22: 415-424.
- 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. (2007) : *Estuarine ecohydrology*. Elsevier, Amsterdam.
- Wolanski, E. and Ridd, P.V. (1986) : Tidal mixing and trapping in mangrove swamps. *Estuarine, Coastal*

- and Shelf Science* 23: 759-771.
- Wolanski, E. (1995) : Transport of sediment in mangrove swamps. *Hydrobiologia* 295: 31-42.
- Wolanski, E. and Spagnol, S. (2003) : Dynamics of the turbidity maximum in King Sound, tropical Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56: 877-890.
- Zhang, X., Chua, V.P., and Cheong, H-F. (2015) : Hydrodynamics in mangrove prop roots and their physical properties. *Journal of Hydro-environment Research* 9: 281-294.