

マングローブ樹林内の潮汐流動と渦動粘性係数

松田義弘*1・岡田 聡*2・小橋大地郎*3

Tidal Flow in Mangrove Forests and the Eddy Viscosity

Yoshihiro MAZDA, Satoshi OKADA and Daijiro KOBASHI

Abstract

The hydraulic resistance characteristics in tidal scale in mangrove forests, on which soil-accumulation processes depend, were studied in the Aira-Gawa mangrove area, Iriomote Island, Japan, which is a riverine type mangrove area. The results are as follows.

- 1) In the mangrove swamp near the bank of the tidal creek the tidal current velocity prevails in the direction along the creek, while in the inside of the swamp the velocity decreases.
- 2) In the mangrove swamp near the bank the momentum equation along the creek is reduced to a balance between the drag force due to mangroves and the eddy viscosity including the shear stress due to mangroves.
- 3) The coefficient of eddy viscosity in the swamp is estimated to be $1 \times 10^3 - 100 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$, which is a high value unexpected in usual coastal areas. The coefficient tends to increase with increasing value of the Reynolds number which is defined using the effective vegetation length scale.
- 4) The above findings suggest that the shear stress due to mangroves plays an important role in water movement in mangrove swamps.

The use of the quantified coefficient of eddy viscosity and the drag coefficient which has been quantified is effective to estimate not only the flow field but also the soil accumulation in mangrove swamps.

はじめに

マングローブ域の生物活動、地形（土壌の堆積、移動）と海水流動の間には、Fig. 1 に示すように、緊密なフィードバック作用が働いている（松田, 1997）。マングローブ樹木からの落葉、落枝などはカニや巻貝などにより破碎され、さらにバクテリアの作用で変成・分解され土壌を形成していく。一方、樹木の成長やベントスの活動はこれらの底泥土壌や落葉の存在に支えられ、また栄養物質や生物自身を輸送したり、底泥を移動させたりする海水流動に強く拘束されている。そしてこの海水流動は堆積物や巣穴の凹凸、地上根や樹幹の抵抗を受ける一方で、底泥を洗掘し、土壌を運んで微地形をつくりだしている。マングローブ域の自然環境（生態系）を維持し、持続的に利用していくためには、このフィードバック機構の定量的な解明がなされねばならない。本研究は、このフィードバックの一端を担う海水流動の特異な振舞

いの機構を解明することを目標としている。

密集錯綜するマングローブの地上根、樹幹、凹凸に富んだ底泥面から海水が受ける抵抗の機構は長周期の潮汐によるものと短周期の波浪によるものとで大きく異なる（Mazda *et al.* 1997a）。ここでは前者を対象とする。なお、外海に通じる感潮河川（tidal creek）の両側に広がる泥湿地（swamp）にマングローブが繁茂する riverine-type（R型；Cintron and Novelli, 1984）では、外海の波浪は creek を遡上する間に減衰し、また、マングローブの樹冠の存在が波浪の発達を妨げるので、潮汐流のみの場となる。そこで、潮汐スケールの現象を対象とする本研究に適した場として R 型マングローブ域を選んだ。

swamp 内を流れる海水は、樹木の存在による形状抵抗、凹凸に富んだ泥面での底面摩擦抵抗、そして海水同士の内部摩擦による渦粘性抵抗を受ける。なお、密集錯綜した樹木（また地上根）の間隙は渦粘性の効果を大きくすると推測される。これらのマングローブ域の特異性に依存する抵抗が定

2004年1月20日受理

*1 東海大学海洋学部海洋科学科 (Department of Marine Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University)

*2 東海大学大学院海洋学研究科海洋科学専攻 (Department of Marine Science, Graduate School of Marine Science and Technology, Tokai University)

*3 東海大学大学院海洋学研究科海洋科学専攻前期課程修了 (Department of Marine Science, Graduate School of Marine Science and Technology, Tokai University (Former))

研究の手法

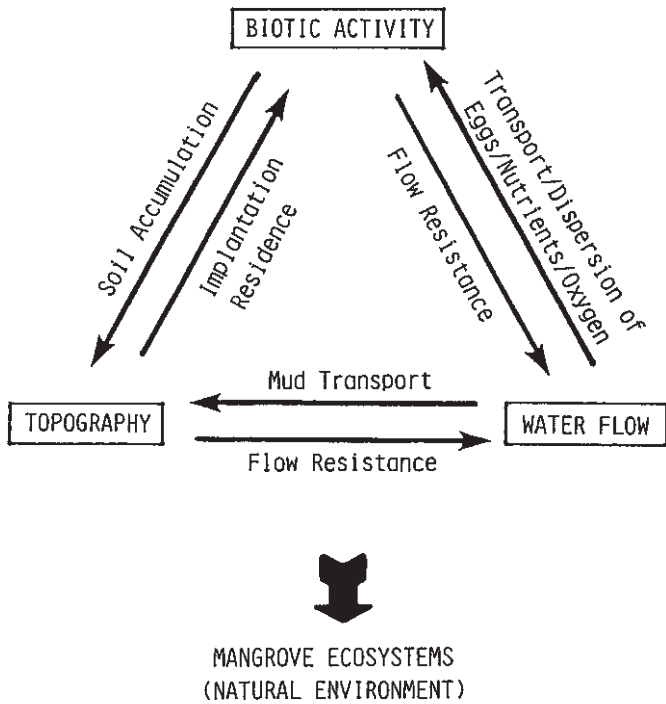


Fig. 1 Feed-back actions among the biotic activity, the topography and water flow.

式化されれば、マングローブ域の海水流動は再現可能となる。

底面摩擦を含めた形状抵抗に関しては、Mazda *et al.* (1997b) により樹木の植生状態と潮汐流速への依存性が定量的に示されている。従って本研究では、渦粘性抵抗を定式化することが目的となる。

R型マングローブ域のcreekに近いswamp内では、creekの強い潮汐流に引きずられて、creekに沿った方向の流れが卓越している。この流れはswamp奥方向に向かって減衰し、creekから15mほどで見られなくなることが現地観測によって示されている(松田, 2001, 2002)。この減衰がswamp内での渦粘性によるものであると考えて、フィールドでの測定結果を解析することにより、渦粘性の機構を解明する。

creekとswampの境界付近をFig.2に模式的に示す。creekを遡る方向をx軸、creekからswamp内へ直角に進入する方向をy軸とする。creek方向での海水の運動方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{C_D u |u|}{2L_e} + f \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

ここで、 u 、 v はそれぞれ x 、 y 軸方向の流速、 ζ は水位、 t は時間であり、 g は重力の加速度である。右辺第二項はマングローブ樹木による形状抵抗の項である。 L_e は樹木の立体形状を考慮して定義される有効樹木間隔、 C_D は形状抵抗係数であり、ともにMazda *et al.* (1997b)がその特性を明らかにしている。ただし、Mazda *et al.* (1997b)によれば、 C_D の中には底面摩擦の効果も含まれている。右辺第三項は渦粘性項である。 f は渦動粘性係数として知られているが、樹木の存在による流れに対するせん断効果、また密集した樹木の間で生じる渦同士の干渉の効果を考慮して、ここでは“みかけの渦動粘性係数”と呼ぶ。

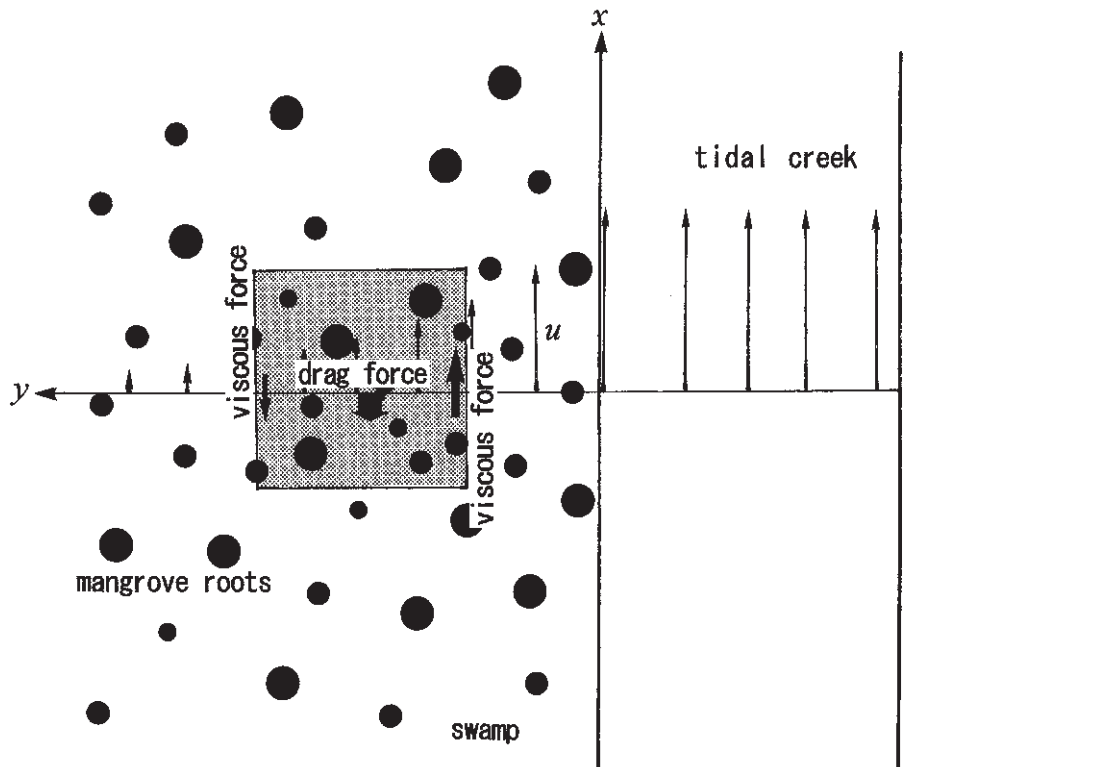


Fig. 2 Schematic view of hydrodynamics in R-type mangrove area.

Mazda *et al.* (1997b), 松田 (2001, 2002) は, 樹木, 地上根の密集錯綜した swamp 内での形状抵抗を論じている. これに倣って, (1)式において, 左辺の3つの項および右辺第一項が右辺第二項に比べて小さく, 無視できると仮定できるならば, 結局次式のように, 右辺第二項 (形状抵抗項) と第三項 (渦粘性項) とが釣り合うことになる.

$$0 = -\frac{C_D u |u|}{2L_e} + f \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

(2)式より, (3)式が得られる.

$$f = \frac{C_D u |u|}{2L_e} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^{-1} \quad (3)$$

この(3)式を用いれば, フィールドでの流速 (u) の測定結果を用いて “見かけの渦動粘性係数” (f) を算出することができる. 即ち, (2)式が成り立てば, (3)式を用いて種々の条件下で算出される f の値を整理することにより, f の定式化が可能となる.

現地測定

沖縄県西表島東部の R 型マングローブ域である相良川とその氾濫域において2000年8月, 10月, 2001年8月に行った現地調査の結果は松田 (2001, 2002) が報告している. 2002年にはほぼ同じ地点 (Fig. 3) において, 5月24日から27日の間, 地形, 水位 (潮位), 流速, 樹木形状の測定を行った.

測定方法の詳細は東海大学海洋学部沿岸物理研究室 (2001), 松田 (2001, 2002) に示したので省略する.

測定結果

全測定期間における潮位および流速の測定記録を Fig. 4 に示す. なお, Stn. T3 での流速記録は正常に得られなかったため, ここでは省く. 流速記録には, 潮汐周期の変動にセイシュ (地形に依存する固有振動) と思われる30分~1時間程度の短時間変動が重なって見られる. Stn. T1 と Stn. T2 の記録は類似の変動をしているが, 測定された全潮汐において, Stn. T1 に比べて Stn. T2 の流速が小さい. 上げ潮で林内に流入し, 下げ潮で creek に流出しているが, creek に沿った流速成分の存在が特徴的である. さらに, 流れの軸方向は Stn. T1 での creek に沿う方向から Stn. T2 での creek に直角方向へと変化している.

なお, Stn. A と Stn. B において潮位を測定した. 記録は省略したが, creek に沿って250mほど離れた位置にある Stn. A と stn. B とで, 潮位変化に差は見られなかった.

解析及び考察

Stn. T1, Stn. T2 のどちらにおいても creek に沿った流速が卓越し, Stn. T1 に比べて Stn. T2 の流速が小さく, さ

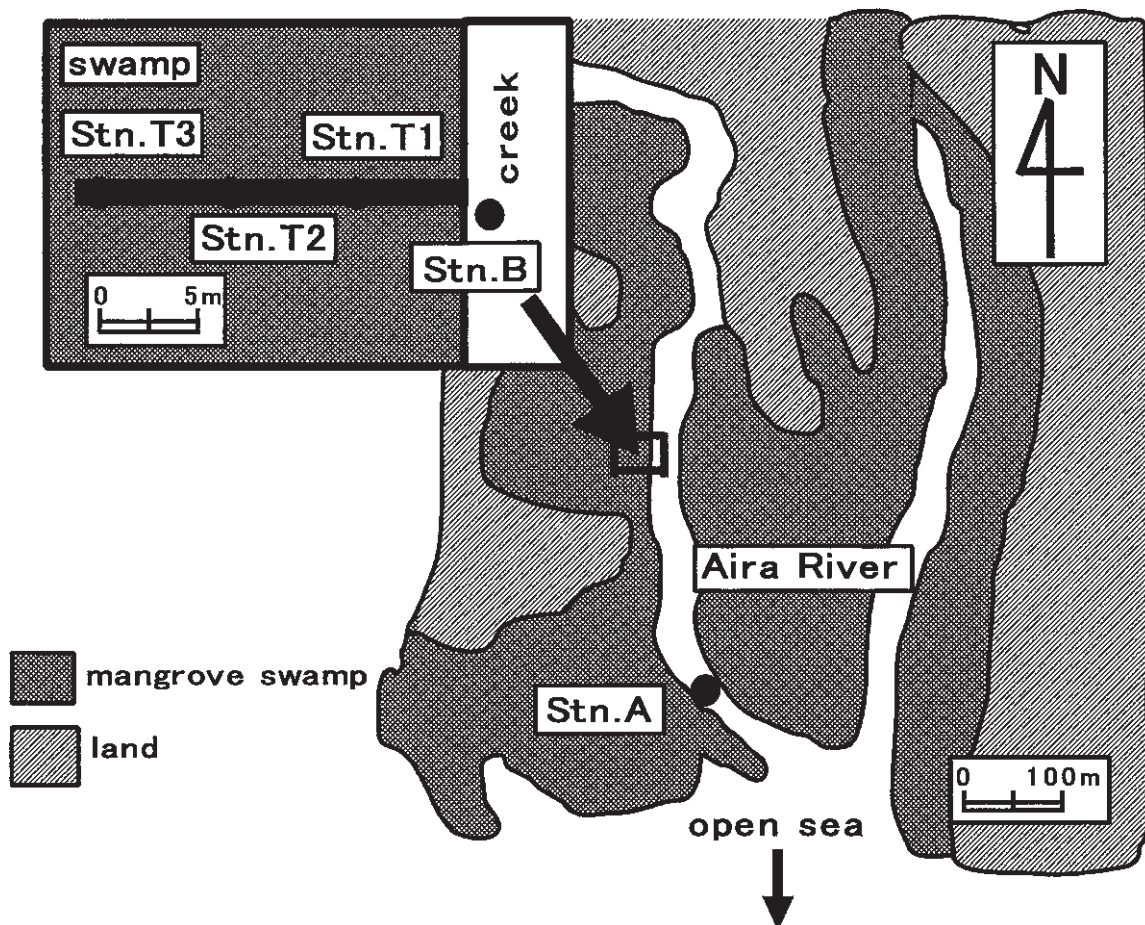


Fig. 3 Observation sites in a R-type mangrove area, Aira River, Iriomote Island, Japan.

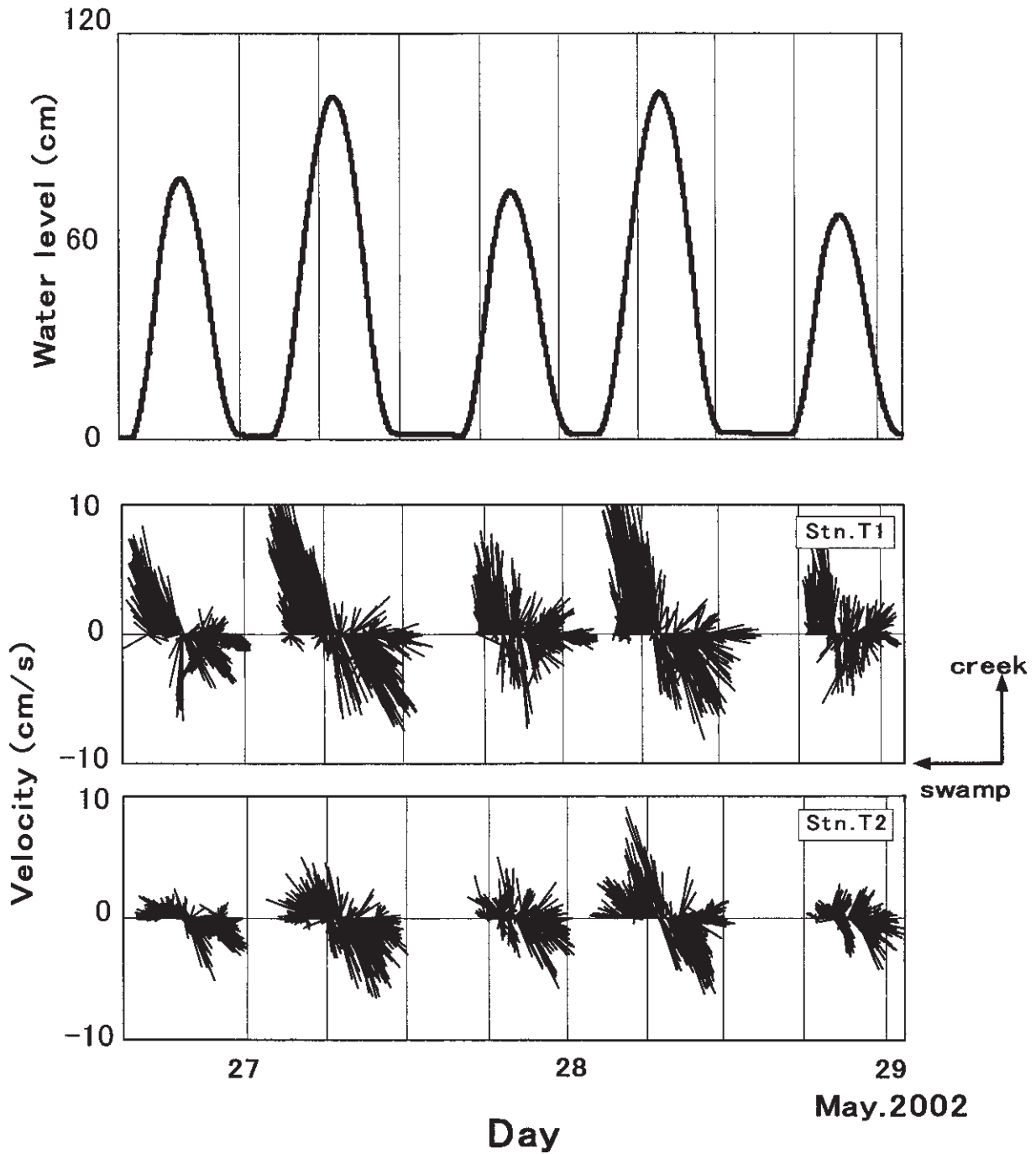


Fig. 4 Time series plots of current velocities at Stns. T1 and T2 and water level at Stn. T1.

らに流軸方向が次第に creek に沿う方向から直角方向に変化しているのは、creek と swamp の境界付近の流れが creek の潮流に引きずられて生じ、一方、creek から離れるとともに、swamp の樹木・地上根の効果で大きく減衰することを示している。これは、佐藤 (2003) が示しているように、外海に直接面した F 型マングローブ域 (fringe-type; Cintron and Novelli, 1984) での潮汐による海水の流入・流出が海岸線に直角方向であるのと対照的である。R 型での流れに対する creek の存在の効果といえる。これは、結局、F 型における海岸線に直角な方向での往復流と異なり、R 型の swamp 内の平面的な循環流をつくることになり、この循環流によって運ばれる土壌粒子の堆積分布を強く支配すると考えられる。

測定結果の一例を Fig. 5 に拡大して示す。Fig. 4 の測定記録に見られた 30 分～1 時間ほどの短周期変動はここで対象としている潮汐現象の解析に適さないので、移動平均操作によって取り除いてある。

Fig. 5 の測定結果を用いて (1) 式の各項の値を求め、Fig. 6 に示す。ここで、 C_D および L_e の値は Mazda *et al.* (1997b) に従って算出された。図に見られるように、(1) 式の左辺第一項 (加速度項) および左辺第三項 (移流項) は、流速が無くなる満潮時付近を除いて、右辺第二項 (形状抵抗項) に比べて 2 桁ほど小さく、無視できるオーダーであることがわかる。なお、creek を遡上する潮汐の波長は 100km のオーダーであり、潮差は 1m ほどであるので、例えば、creek に沿う 100m の間の潮位の差は最大で 2mm ほどと推算される。

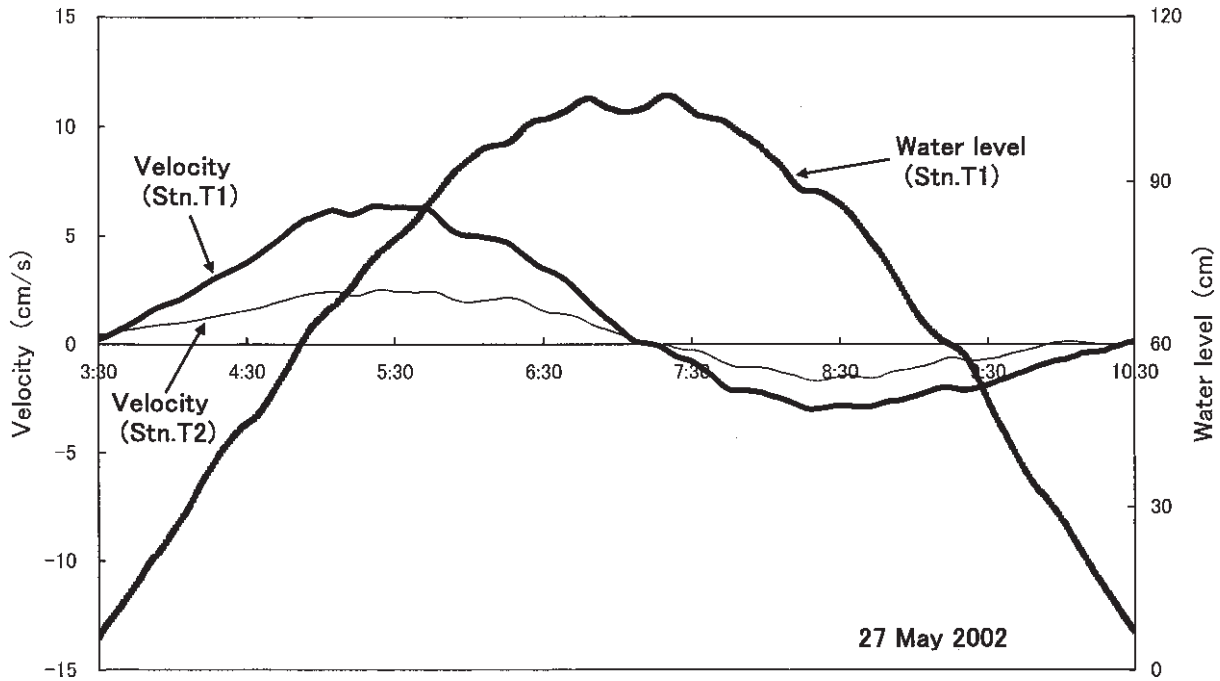


Fig. 5 Time series plots of velocity components along the creek (Stns.T1 and T2) and water level at Stn.T1.

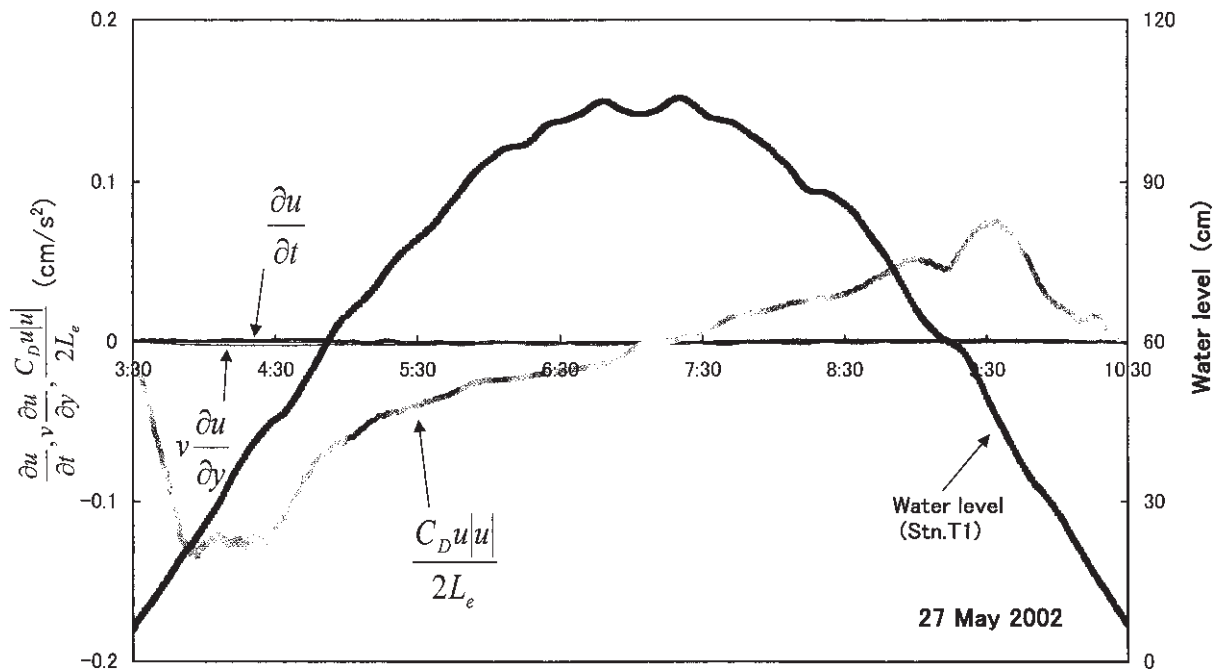


Fig. 6 Comparison between various terms in motion equation along the creek.

測定結果の項で述べたように、この差は測定誤差の範囲に入る。従って、右辺第一項は（左辺第二項も同様の理由で）実測値からは計算できないが、推算によれば、右辺第二項（形状抵抗項）に比べてやはり2桁ほど小さくなる。結局、左辺の3つの項と右辺の第一項は右辺第二項に比べて無視でき、(2)式に示すように、形状抵抗は渦粘性項の存在によって補償されることになる。即ち、creekに近いswamp内のcreekに沿う方向での海水運動は、creekの潮流に起因して生じるswamp内の渦粘性力と形状抵抗力が準静的に釣り合うことによって形成されているといえる。

上に示した(2)式の妥当性に従って、(3)式を用いて“みかけの渦動粘性係数” (f) を算出した。

なお、Mazda *et al.* (1997b) は形状抵抗係数 (C_D) が有効樹木間隔 (L_e) を代表長さとして(4)式で表わされるレイノルズ数 (Re) に依存することを示している。

$$Re = \frac{\bar{u}L_e}{\nu} \quad (4)$$

ここで、 \bar{u} は水深平均流速、 ν は動粘性係数である。形状抵抗係数と“みかけの渦動粘性係数”のどちらも樹木の植生状態、樹木間の海水流動の振る舞いに依存していると思われる。

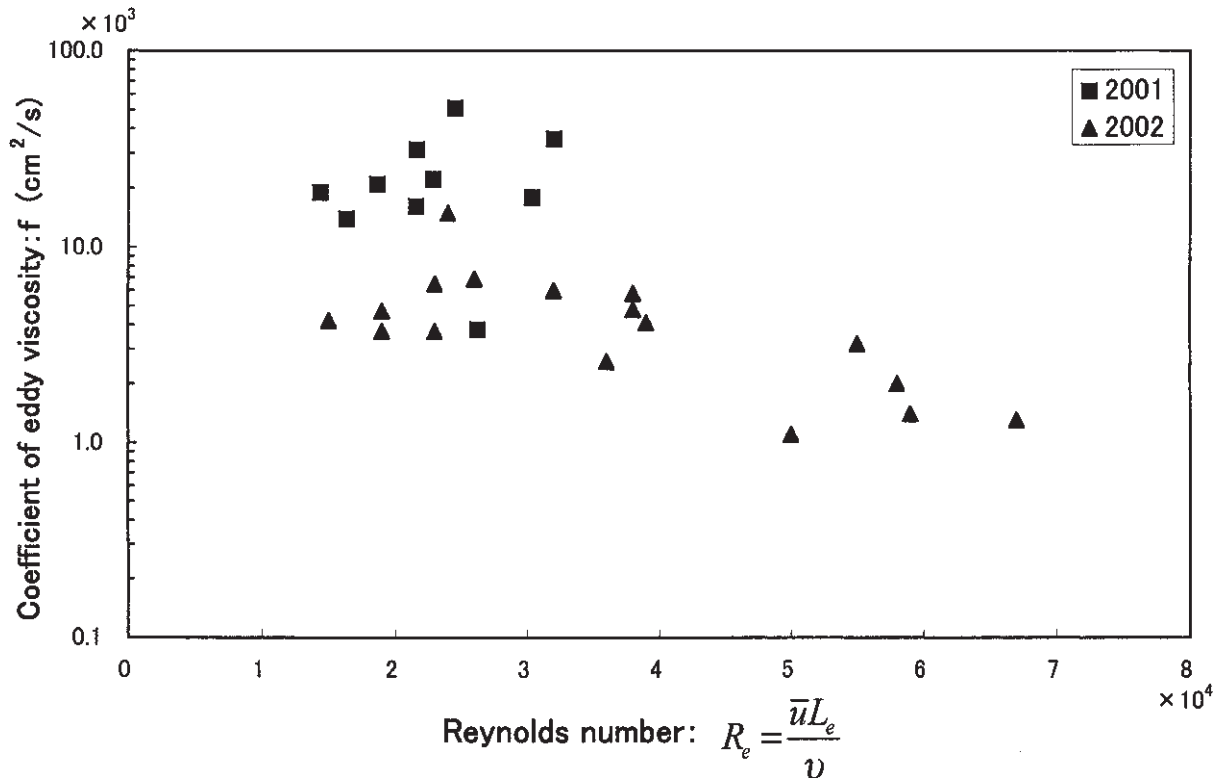


Fig. 7 Relationship between the coefficient of eddy viscosity and Reynolds Number.

る。そこで、これらの類似性を考慮して、 f の計算結果をレイノルズ数で整理して Fig. 7 に示す。図には、本測定地点に隣接する地点で2001年に測定した値（松田，2002）も加えた。図に見られるように、 f は $1 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ の値となっており、レイノルズ数の増大とともに減少する傾向を示している。

マングローブ域のように複雑な立体形状を持った構造物が密集錯綜している場での渦動粘性係数に関する知見は全くない。一般に渦動粘性係数はその場の空間スケールとともに大きくなり、構造物のない沿岸海域では $10 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーである（宇野木ら，1990）。従って、Fig. 7 に得られた大きな値は、マングローブ域が上記の知見を適用できない特殊な場であることを示唆している。

Fig. 7 はみかけの渦動粘性係数がレイノルズ数に依存する傾向を示しているが、ばらつきが見られる。異なる2地点で、異なる2年の異なる13潮汐による測定結果に基づくものではあるが、さらに測定を重ね、データを蓄積することによって定式化に努めねばならない。

まとめ

マングローブ域環境は生物活動、地形の形成（土壌の堆積，移動），そして海水流動の三者のフィードバック作用により維持されている。本研究では、特に、土壌の堆積，移動への関与を考慮して、海水流動の機構を定量的に解明することを目的とした。

ここでは、潮汐時間スケールの海水流動を対象とし、これまで未解明である swamp 内の渦粘性の力学を定式化するこ

ととし、これらの目的に適した R 型マングローブ域である西表島相良川流域をフィールドとした。

フィールドでの測定結果に基づき、swamp 内の渦粘性に関する以下の知見が得られた。

- 1) 渦粘性の効果で、creek に沿う方向の流速は swamp 奥に向かって大きく減衰する。
- 2) creek に近い swamp 内の creek に沿う方向での海水運動は、creek の潮流に起因して生じる swamp 内の渦粘性力とマングローブ樹木群による形状抵抗力の釣り合いによって形成されている。
- 3) みかけの渦動粘性係数の値は $1 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ となり、レイノルズ数の増大とともに減少する傾向がみられ、定式化の可能性が示された。
- 4) マングローブの樹木，地上根の存在を考えると、上記の大きな値は、マングローブ域が既往の知見を適用できない特殊な場であることを示唆している。

みかけの渦動粘性係数が定式化されれば、既に得られている形状抵抗係数とともに用いることによって、swamp 内の海水流動を再現することができる。

謝 辞

本研究は、(財)亜熱帯総合研究所による平成12年度～平成14年度内閣府委託調査研究の中で、著者らが分担したものである。本研究に誘っていただき、種々の便宜、助言をいただいた琉球大学農学部佐藤一紘助教授に深く謝意を表す。また、現地観測の基地、宿舎として、沖縄国際マングローブ協会の西表マングローブ研究所を利用させていただいた。協

会の関係各位，研究所を献身的に管理されている山中多茂男氏に深く感謝する。

引用文献

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

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.

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.

松田義弘 (2001): 潮汐流動に対するマングローブ樹木の抵抗性に関する調査. 平成12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, ((財)亜熱帯総合研究所 編), 沖縄, 189-205.

松田義弘 (2002): マングローブ樹木による渦粘性力. 平成13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, ((財)亜熱帯総合研究所編), 沖縄, 287-294.

佐藤一紘 (2003): マングローブ域の堆積の実態に関する研究 (III) —連続する1潮毎の堆積に関する検討—. 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, ((財)亜熱帯総合研究所編), 沖縄, 223-236.

東海大学海洋学部沿岸物理研究室 (2001): 第6回ベトナム・マングローブ水域物理環境調査報告書, 東海大学海洋学部, 84pp.

宇野木早苗・斎藤 晃・小菅 晋 (1990): 海洋技術者のための流れ学. 東海大学出版会, 京, 312pp.

要 旨

マングローブ林内の土壌堆積機構の基礎となる潮汐流動に対する渦粘性力を定式化するため, R型マングローブ域である西表島相良川流域で調査を実施し, 以下の知見を得た。

- 1) 渦粘性の効果で, creek に沿う方向の流速は林内で大きく減衰する。
- 2) 上記の海水運動の場は creek の潮流に起因する渦粘性力と形状抵抗力で釣り合っている。
- 3) 渦動粘性係数の値は $1 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ となり, 有効樹木間隔を用いたレイノルズ数の増大とともに減少する傾向がみられ, 定式化の可能性が示された。
- 4) 上記の値は既往の知見を適用できない大きな値であり, マングローブ域における樹木, 地上根の特異な存在による効果を示唆している。

定式化された渦動粘性係数と既に得られている形状抵抗係数を用いることによって, 林内の海水流動が再現され, 土壌堆積機構の解明へと展開する。