

マングローブ水域におけるクリーク・スオンプ系の 3次元流動の数値モデル化

中 辻 啓 二*・大 屋 敬 之**・J. E. Ong***・W. K. Gong****

1. はじめに

マングローブとは熱帯・亜熱帯の海岸、河口、入り江等の潮間帯に生育する塩性植物の総称である。近年の過剰な伐採により、マングローブ林は加速度的な消失の傾向にあり、CO₂による地球の温暖化と関係して注目を浴びている。熱帯雨林の伐採と異なる点は、生態系豊かなが故のエビの養殖池への転換、また大都市の海岸線に繁茂している故の埋立後の工場誘致であるとか、先進国、とりわけ日本の経済圧が作用していることである。著者の一人が昨夏バンコックを訪れたが、2年前に繁茂していた海岸線ではマングローブ林が全く消失していた。

生物や生態系関連の研究は進んでいるが、栄養塩の輸送に關与する物理過程は未だ明確ではない。流体力学的にマングローブ・エスチュアリーの特徴をあげると、①潮汐の影響を受けて海水と陸水が混合しあう汽水域であること、②豊かな生態系を保持し、生物連鎖が多様であること、③エスチュアリーは河川で言う低水路のクリークと高水路に相当する（氾濫原的な）スオンプから構成されており、潮の満ち引きにより海水はスオンプへの氾濫を繰り返していること、④氾濫原の存在は河口からの流出が流入を上まわるという非対称な流速変化をもたらしていること、⑤クリークは蛇行していること、等が指摘できる。

本研究の対象とするマレーシア国のマーボック・エスチュアリーと海岸線がわずか10 kmしか離れていないムダ川（マレー半島の中央山岳部から流れる）の河口は、マングローブの生育はそれほどでもなく、且つ河口が礫であることから考えると、マングローブ・エスチュアリー形成には海の外力が働いていると考えるのが妥当であると著者らは考え始めている。

Qng and Gong (1991) はマーボック・エスチュアリーの観測結果から大潮時には鉛直方向の塩分分布は緩混合型を示すのに対して、小潮時には等塩分線が水平になる

成層化が進むことを指摘している。雨季に大量の陸水が流入してくる場合はなおさら弱混合の形態となる。

著者らは海水がスオンプに氾濫し、流出の時間が遅れることによって生じる河口部の流速変動の非対称性ならびに蛇行水路におけるスオンプへの氾濫状況を既に議論してきた。（例えば、中辻ら：1994, Nakatsuji et al., 1996）しかしながら、それらはいずれも水深方向に積分した平面2次元での議論であった。現象を的確に理解するには、また生態系への展開を前提にするならば、クリーク内の密度変動を考慮した3次元的な取り扱いが必要となる。

2. クリーク・スオンプの数学モデリング

(1) 3次元数値計算の概要

マングローブ・エスチュアリーはクリークとスオンプからなる自然の複断面水路であることは既に述べた。クリークでは密度勾配が鉛直方向と縦断方向に見られ、流動は三次元的な複雑な挙動を示す。一方、スオンプにおいては、流れは密に繁茂したマングローブの根による流れの抵抗と氾濫水の水面勾配の釣り合いに支配されている。また、潮汐変動により時々刻々と水際線が変動する。このような水域に3次元モデルを適用するのは困難なため、本研究では流れが三次元的に挙動するクリークを三次元密度流モデルで取り扱い、海水が進入して水際線が変動するスオンプには水深方向に積分した平面二次元モデルを適用した。前者には大阪大学で開発されたODEMを、後者には英国ブラッドフォード大学で開発されたDIVASTを用いた。両モデルをクリークの水際線で連結させ、マングローブ・エスチュアリーの流れを再現することとする。

(2) ODEMの概要（中辻, 1996）

ODEMは連続方程式、水平2方向運動方程式、静水圧近似式ならびに拡散方程式からなる。密度場での鉛直方向渦動粘性係数、渦拡散係数は勾配型リチャードソン数の関数として表現し、成層の効果により鉛直方向の乱れの抑制を考慮している。

(3) DIVASTの概要（Falconer, 1991）

DIVASTは連続方程式、平面2次元運動方程式および拡散方程式からなる。このプログラムの最大の特徴は進

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 (株)建設技術研究所

*** Ph.D. Professor, Center, U.S.M. Malaysia

**** Ph.D. School of Biological Science, U.S.M. Malaysia

入していく流体の先端運動を合理的に計算できることである。つまり、先端の計算メッシュが水域であるか、陸域であるかを正確に判定する機能を有していることである。この機能はスオンプ内での水際線の移動を表現するのに適している。

(4) 両モデルの連結方法

モデルの連結は以下の方でおこなう。

① ODEM から DIVAST へ

ODEM で求めたクリークでの水位を DIVAST の境界条件として受け渡し、また塩分についてはクリークからスオンプへ海水が流入している時に限り、ODEM の計算結果の塩分を ODEM の境界条件とする。

② DIVAST から ODEM へ

DIVAST により計算されたスオンプの境界での流量フラックスから、クリークでの水位上昇量を計算し、足して加える。また、塩分について境界でのクリークの最上層メッシュに塩分フラックスとして足し込む。

以上の方法では、クリークとスオンプの連結において運動量の輸送が考慮されていないが、実際的水域においてもクリークとスオンプの流れも水面勾配が支配的であることから上述の連結法を採用した。

3. 数値計算結果

(1) モデル設定と諸条件

図-1 に示す直線水路のクリークと一様傾斜のスオンプからなるモデル・エスチュアリーを想定した。寸法はマーボック・エスチュアリーのデータを参考に、長さ 20 km、幅 200 m、水深 8 m、勾配 2/10,000 のクリークと、長さ 20 km、幅 400 m、勾配 3/1,000 のスオンプを設定した。クリークは 10 層位とし、流下方向ならびに横方向の空間間隔はそれぞれ 100 m と 10 m とした。外力としては大潮時の振幅 1.15 m の半日周潮と河川流量 2.00 m³/s を与えた。

スオンプにおける粗度については Wolanski and Ridd

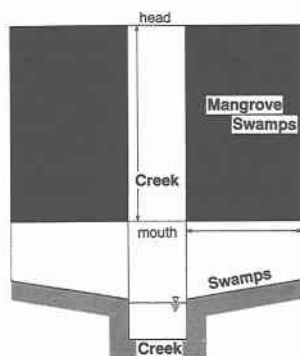


図-1 クリーク・スオンプ系のモデル

(1986) は観測結果より無次元抵抗係数で $\gamma^2=4.0$ としている。この値はマンギングの抵抗係数 $n=0.4 \text{ m}^{-3}\cdot\text{s}$ に相当しているが、一般的な河川の値より一桁大きい。また渦動粘性係数や拡散係数についてはマングロープ水域における実測データがないため、これまで大阪湾などのエスチュアリーに計算に用いられてきた値 $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ を採用した。

(2) 流速分特性と塩分分布

図-2 はクリーク内の流速および塩分分布の時間変化を示す。上から 3, 6, 9, 12 時間後の分布を示す。左端が河口、右端が上流である、上げ潮時に河口より海水が進入し、河口部においては強混合状態となっている。下げ潮時には陸水が上流から表層流れ、成層状態となっている。

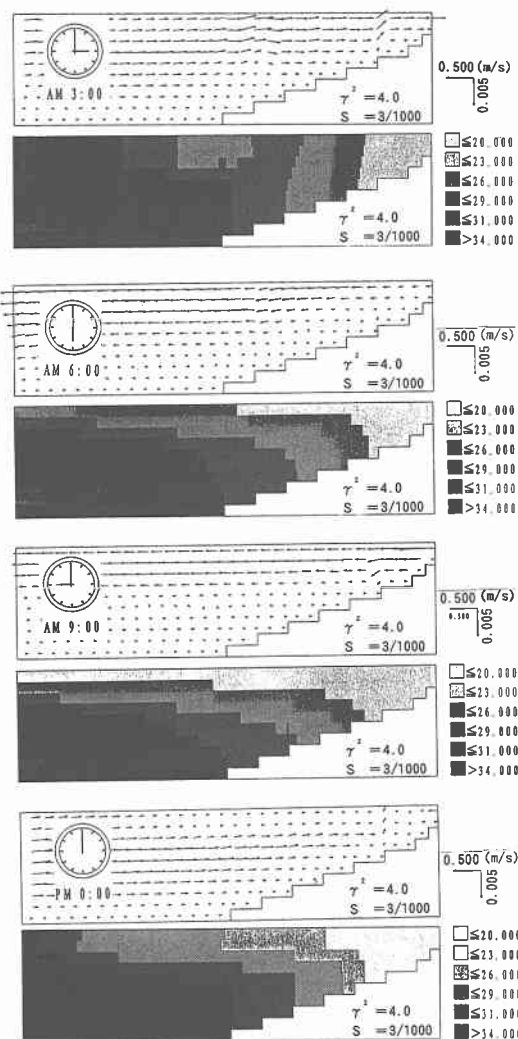


図-2 クリーク内の流速および塩分分布

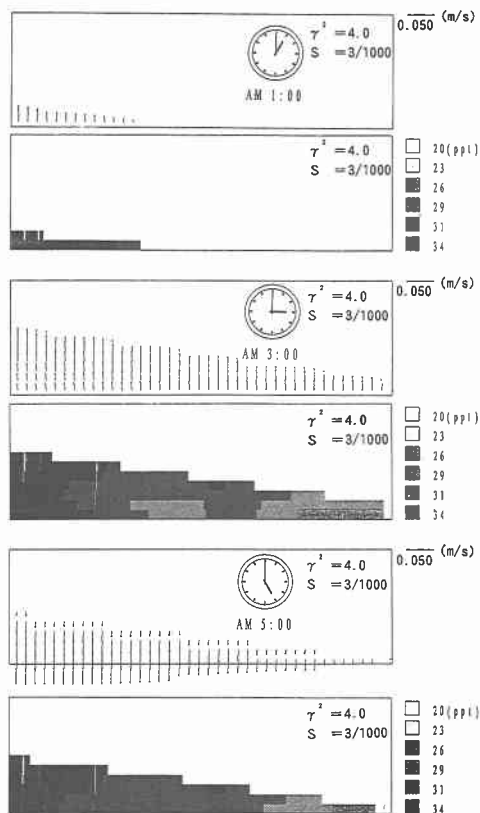


図-3 海水のスポンへの氾濫状況

図-3は図-2の上げ潮時におけるスポンへの海水の氾濫状況を示す。上図は氾濫水の流速ベクトル，下図は海水の氾濫状況である。図は上から1, 3, 5時間後の結果である。3時をピークに海水が氾濫し，クリークに戻っていく様子が分かる。また，スポン内の流速は最大でも5 cm/s程度とクリークの流速と比べると非常に小さな値となっている。塩分分布はクリークでの塩分の値を反映して河口部では塩分は高く，陸水流入がある上流部では低い値となっている。しかしながら，スポン中の塩分分布を観測した例はないので，ここでは結果を示すだけにとどめる。

4. 感度解析

スポンの一時貯留効果を議論する場合に重要な点は，水面勾配と摩擦力の均衡が支配的であり，また，流速は数 cm/s と小さいことである。そこで，スポン内の摩擦係数と底面勾配を変えた実験を行い，河口での流速の非対称性に及ぼす効果を検討した。

(1) スポンの底面摩擦係数の影響

図-4はスポンの粗度を $\gamma^2=2, 4, 8$ と変化した場合の河口部での流速および潮位の時間変化である。 $\gamma^2=$

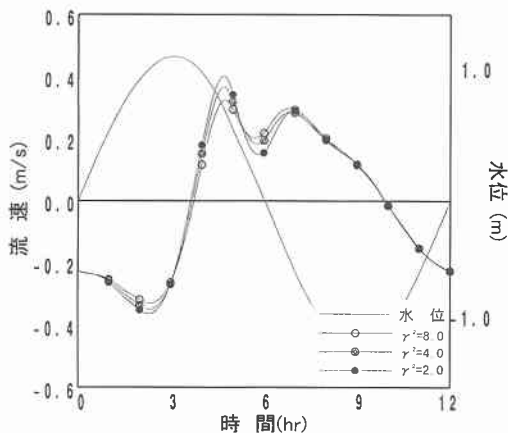


図-4 粗度を変化させたときの河口部流速

4.0は密生した高水数でのマンニングの粗度係数 $n=0.4 \text{ m}^{-3}\cdot\text{s}$ に相当する。この範囲の粗度係数の違いが流速変動に及ぼす影響はほとんどなく，流速変動はほぼ同じ傾向を示している。潮流流速は潮汐の水面勾配によって生じることから，流速変動は潮汐変動に1/4周期遅れて正弦振動することになる。この事実と比較すれば，流速変動は下げ潮時の流速勾配が大きく，最大流速の近くでくぼみが現れ，その後ゆっくりと減速していく，流速変動の非対称性は計算結果に現われている。この非対称性はOng and Gong (1991) や Wolanski (1992) の実測でも確認されている。

(2) スポンの横方向底面勾配の影響

図-5はスポンの底面勾配を1/1000, 3/1000, 6/1000とした時の流速変動への影響を示す。 $S=1/1000$ での下げ潮時と上げ潮時の流速はそれぞれ46.4 cm/s, -47.3 cm/s, $S=3/1000$ については36.2 cm/s, -35.0 cm/s, $S=6/1000$ については35.1 cm/s, -26.0 cm/sとなっている。さらに流速の非対称性の目安として，それぞれのケースで上げ潮時と下げ潮時との比をとると， $S=1/1000$ は0.97, $S=3/1000$ は1.03, $S=6/1000$ は1.35となる。このことから，底面勾配が小さいほど流速の絶対値は大きくなるが，流速の非対称性は底面勾配が大きいくほど大きくなる傾向にある。また，同図より勾配が小さいほど，ピークの発生時刻が遅れていることが分かる。

そこで，クリークとスポン間の流量交換を示したのが図-6である。スポンへの流入は水位が最高になる前に最大となり，水位がピークを過ぎたあたりから減少し始める。流入が流出に変わるのは3～4時間の間であり，4.5時頃にはクリークに戻る最大値を示す。但し，その値はスポンでの底面勾配が小さいほど大きくなる。そして，残存するスポン内の流量は時間をかけてクリークに戻る。この時間の遅れがスポンの一時貯留効果（エ

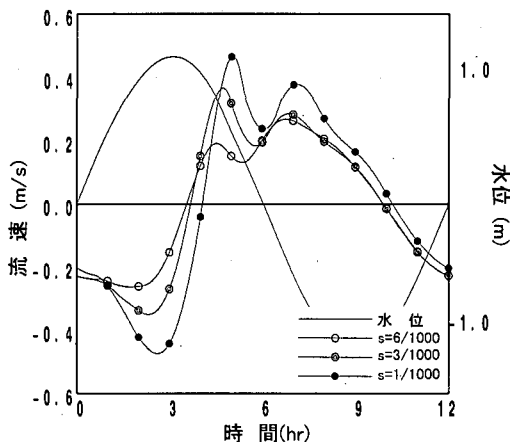


図-5 横方向勾配を変化させたときの河口流速

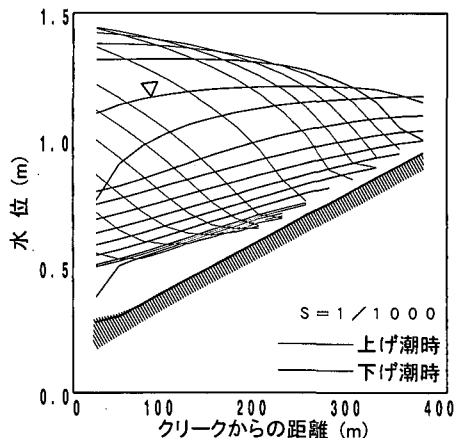


図-7(a) スオンプにおける横断方向水面形

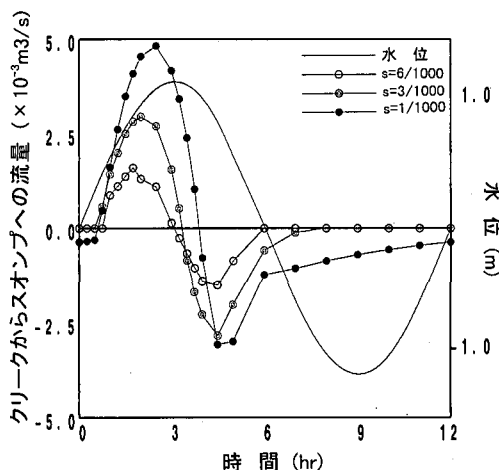


図-6 クリーク・スオンプ間の流量交換

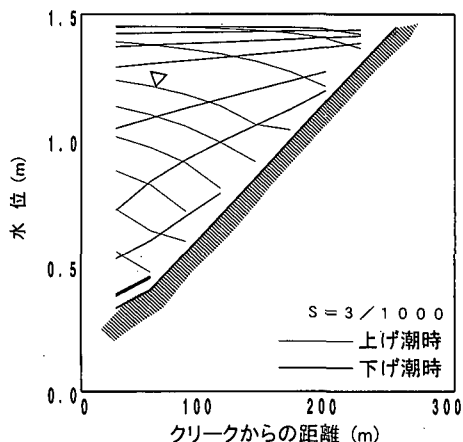


図-7(b) スオンプにおける横断方向水面形

ントラッピング)に相当することになる。6/1000 勾配の場合には半潮汐の間にスオンプとの流量交換は終了している。クリーク内の流速変動はこの流量のやりとりを考慮すれば、図-5 の流速変動の非対称性は理解できる。

図-7 は河口部近くのスオンプの横断方向の水面形の時間変化を示す。水面勾配が 1/1000 と 3/1000 の例を比較のために示す。S=1/1000 の海底課程勾配ではクリークからの氾濫水がスオンプで段波状に進入するが、潮が上げ潮から下げ潮に代わっているにもかかわらず、スオンプの奥ではまだ拡がる状況が現れている。底面勾配の小さいほど、スオンプ内での流入水の挙動や分散等、クリークとスオンプ間の流量交換に関与する機構が複雑になっているものと思われる。

5. ま と め

マングロープ・エスチュアリーはクリークとスオンプ

から構成されている。潮汐の変動に伴ってスオンプへの海水の氾濫が繰り返され、両領域の流量交換や物質輸送に潮汐の果たす役割は非常に大きい。第一に指摘される効果は河口部での流速変動の非対称性である。また、雨季に特徴的に見られる陸水の流入が、潮流変化と相まってクリークの混合混合形態をかえることになる。マングロープ・エスチュアリーの物理現象を理解するためには、且つ生態系への展開を考えるならば、密度構造を含む 3 次元的な取り扱いが必要である。このような観点から、やや変則であるが、クリークは 3 次元で、スオンプは 2 次元で評価できる結合モデルを作成した。最も簡単な水域モデルを作成し、スオンプの役割、スオンプの粗度係数や海底勾配の影響を明確に出来た。

参 考 文 献

中辻啓二・伊藤 渉・村岡浩爾・R. A. Falconer (1994): 熱帯

- 性マングローブ河口の水理特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1126-1130.
- 中辻啓二 (1996): 海洋・閉鎖性海域 (環境数値流体力学講座2), 数値流体力学, 4巻, 4号, pp. 306-322.
- Falconer, R. A. (1991): An improved representation of flooding and wind stress effect in a two-dimensional tidal numerical model, Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2.
- Nakatsuji, K., Ohya, Y. and Shiono, K. (1996): Boundary-fitted Curvilinear Transformation for applying to Meandering Creeks in Mangrove Estuaries, Flow Modelling and Turbulence Measurement IV, Balkema, pp. 623-630.
- Ong, J. E. and W. K. Gong (1991): Characterization of a Malaysian Mangrove Estuaries, Estuaries, Vol. 14, No. 1, pp. 38-48.
- Wolanski, E. (1992): Hydrodynamics of mangrove swamps and their coastal waters, Hydrobiologia, Vol. 247, pp. 141-161.
- Wolanski, E. and Ridd, P. (1986): Tidal mixing and trapping in mangrove swamps, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 23, pp. 759-771.
-