

熱帯性マングローブ河口の水理特性

中辻啓二*・伊藤 渉**・村岡浩爾***・R. A. Falconer****

1. まえがき

マングローブ水域の環境破壊が地球環境問題の一つとして重要視されている。マングローブ水域は河口に続く河川(クリーク)と両岸に広がる湿地(スオンプ)から構成されている。上げ潮時には、外洋海水がクリーク両岸から大量に溢れてスオンプに氾濫する。また下げ潮時には、スオンプからクリークへ流れ出て、河口から海域へと流出する。マングローブ林の研究は主として生態系に関する生物学を中心に進められてきた。しかし、栄養塩の輸送や拡散、底泥の堆積や浮上に関する物理過程の研究は非常に少ないのが現状である。

本研究では、Universiti Sains Malaysia の生態学研究者が大潮時と小潮時に Sungai Merbok Estuary で実測したデータを用いて、熱帯性河口特有の水理現象の抽出を図る。さらに、単純化したマングローブ水域を想定した数値実験を実施して、スオンプスの流動特性に及ぼす影響を定量的に検討する。

2. Sungai Merbok Estuary の地理と気候の特性

Sungai Merbok 河口はマレーシア半島北西にあり、北緯 5°40' 東経 100°25' に位置する。図-1 に示すように全長は約 35 km、水深は概ね 3~15 m で変化し、合流部では局所的に 20 m に達する。川幅は河口部で約 2 km、上流端では 20 m となっている。また、集水域は 550 km² である。そのうち潮間域のスオンプスの面積は約 50 km² である。気候特性は、1月~3月は北東モンスーン、5月~9月は南西モンスーン季節であるが、山岳やスマトラ島に保護されるために、その影響はほとんどない。1年間のうち、無風状態の日が 60% も占めている。年平均降水量は 2,068 mm であり、このうち 44% は蒸散し、56% が河川へ流れる。降水量から算定した年平均流量は 20 m³/s である。9月~10月および 4月が雨期に当たり、1月~3月は乾期となる。

3. 観測データ

解析の対象データは、1985年7月2日(大潮時)と同年12月4日(小潮時)にそれぞれ測定されたものである。測点は図-1に示す河口部断面で5点、上流側2点である。横断面図は図-2に示す。流速は水表面から底部まで 1 m 毎に、塩分は水深 5 m 以浅では鉛直方向に 3 点、5 m 以深では 5 点の測点を設けてそれぞれ測定を行っている。また、測定は 8 時から 22 時まで毎正時に行っている。

4. 観測データの解析結果

図-3は大潮時と小潮時の潮位と河口部の潮流の時間変化を示す。測点 G および H の位置はそれぞれ河口から、19 km、22 km となっている。図-3から分かるように、河口付近(測点 C)での振幅は、大潮で 1.1 m、小潮

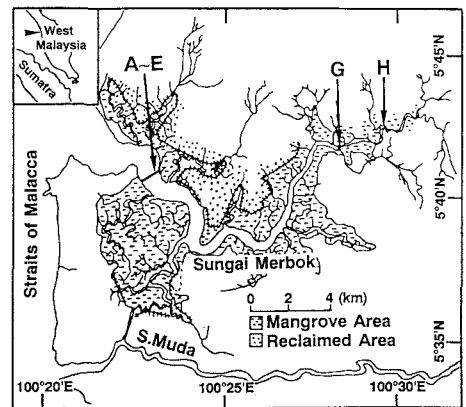


図-1 Sungai Merbok Estuary の地形特性

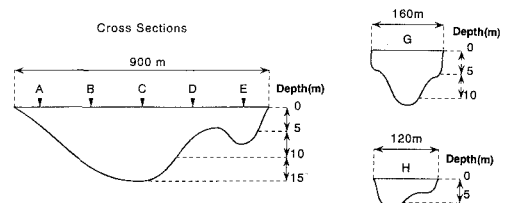


図-2 観測点の横断面図

* 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 JR 東海(株)

*** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

**** Ph.D. Professor, Univ. of Bradford, UK.

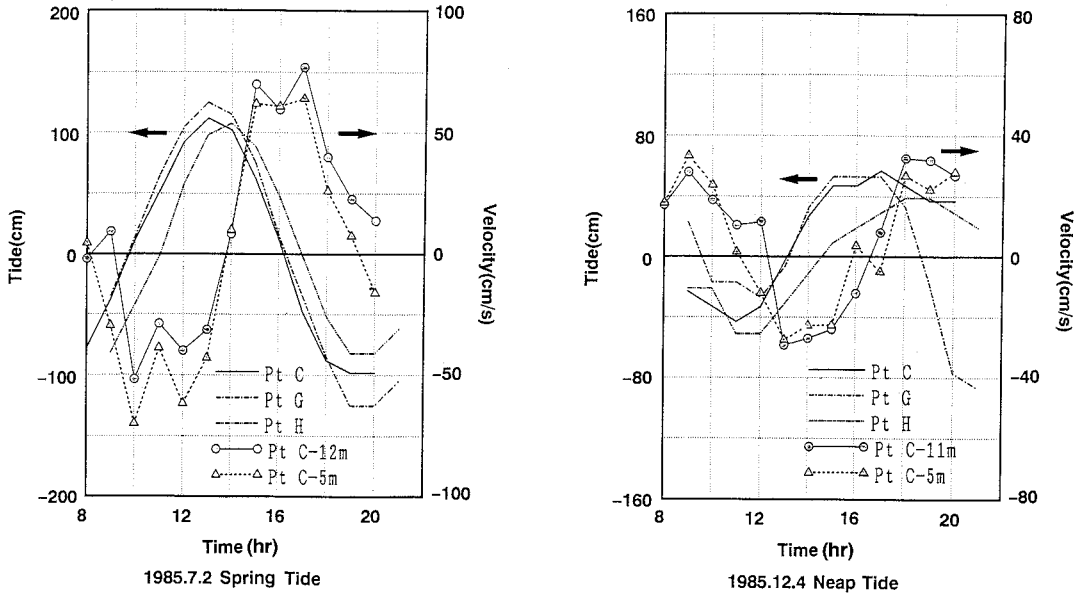


図-3 潮位と河口断面内流速の時間変化

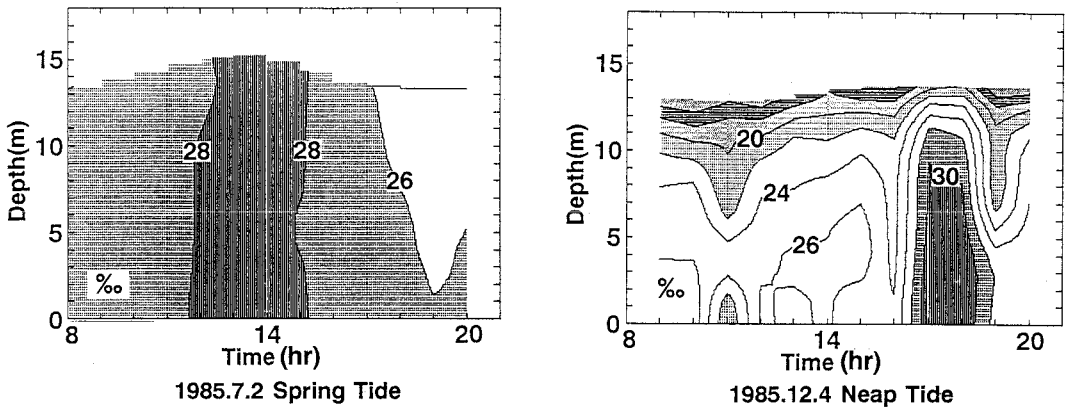


図-4 潮位と塩分濃度の鉛直分布の時間変化

で0.5 mとなっており、0.6 m以上の差がある。また、測点 H においても、大潮、小潮ともに潮汐振幅が遅れ時間なく変動していることから、河口から 22 km 地点まで感潮区域であることが分かる。図中の符号入り実線と破線は、測点 C の海底から 12 m (小潮時は 11 m) と 5 m の潮流速の時間変化を示している。潮流速は潮位変動に 1/4 周期遅れて変動する。大潮においては下げ潮時の流速勾配が大きく、潮流変動に非対称性が見られる。この非対称性は Wolanski (1992) によっても指摘されている。また、最大流速の近くでくぼみが現れるのが特徴である。これに対して、潮位変動の少ない小潮時にはこのような潮流変動の非対称性は認められない。

このような流速の非対称性現象は、オーストラリアの

コーラル・クリークや日本の西表島の仲間川などのクリークでも観測されており、マングローブ水域のエントラップ (一時貯留) の影響によるものと推測される。また、西表島の仲間川ではこのような流速の非対称性が、河口閉塞を防ぐ役割を果たしていることが報告されている (Wolanski et al.; 1991)。また、底泥の掃流速度は約 0.45 cm/s であることから、下げ潮時には大量の底泥が外海に輸送されることが予想される。

図-4 は大潮時と小潮時の C 点における塩分の時間変化を示す。小潮時には降水の影響もあり、成層が形成されているのが観察される。上層および下層の塩分差は最大で 13.6‰ に達している。図には示さないが、上流部の測点 G, H においても成層化が認められ、上流に行くに

したがって塩分濃度は減少している。このことから、小潮時の混合状態は弱混合になっていると判断できる。最大塩分濃度が現れるのは流入から流出に変わる高潮位の時間(17時)であり、海底面から12mの塩分濃度は30%になっている。これに対して、大潮時には塩分濃度は全水深にわたってほぼ一様であり、鉛直方向によく混合されていることがわかる。このような弱混合から強混合への混合形態の遷移過程は他の実測データ (Ong et al.; 1991) からも確認されていることから、Sungai Merbok Estuary では小潮一大潮のサイクルで塩分成分の形成と破壊が繰り返されていると考えられる。

5. クリーク・スオンプス (C-S) ・システムの流動特性のモデル化

図-3に示したように、河口のクリークで観測した潮汐流の非対称性がマングローブ水域の特徴として認められている。その原因として、スオンプへの大量の海水の氾濫や一時的な貯留効果によるクリーク内の潮汐往復流との位相の遅れが指摘されている。潮流の非対称性は、それ故、大量の海水のスオンプへの氾濫侵入の形態、密集した地上根や底生生物の巣穴による抵抗、そしてスオンプの勾配に依存することになる。

モデル化に際しては、図-5に示すクリークとスオンプとを連結したシステムを仮想して、マングローブ水域の物理過程の検討を行う。水理諸量は表-1に示すSungai Merbok Estuaryの支流のBuanje Estuaryの実測データを用いた。

(1) 数値モデルの概要

用いたプログラムは、干満差の大きな沿岸水域の二次元流動を対象に開発された英国Bradford大学のDIVASTである。以下に本モデルのx, y方向の運動方程式および連続式を示す。

$$\frac{\partial UH}{\partial t} + \beta \left[\frac{\partial U^2 H}{\partial x} + \frac{\partial UVH}{\partial y} \right] + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \gamma^2 U \sqrt{U^2 + V^2} - \nu_t H \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] = 0 \dots (1)$$

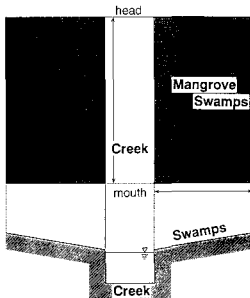


図-5 C-Sシステム図

表-1 水理諸量

河口水深	8.0 m
河床勾配	1/1000
水路幅	60 m
水路長	4000 m
スオンプの流下方向勾配	2/10000
スオンプの横方向勾配	3/1000
スオンプの奥行き	400 m

$$\frac{\partial VH}{\partial t} + \beta \left[\frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial V^2 H}{\partial y} \right] + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \gamma^2 V \sqrt{U^2 + V^2} - \nu_t H \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right] = 0 \dots (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \dots (3)$$

ここで、gは重力加速度、Hは全水深、U, Vは水深方向に積分されたx, y方向の流速成分、βは流速の鉛直方向分布に関する運動量補正係数 (=1.016)、ζは水位変動量、ρは密度、γ²は底部摩擦係数をそれぞれ示している。

このモデルの特徴は、海か? 陸か? を判断する機能を有しており、スオンプ内の流動の解析に適していることである。海側境界では振幅1.0m, 周期12.5時間の潮汐を外力として与えた。また、上流側境界では流量はゼロとした。計算にあたっては、クリークの中心軸でスリップ条件を適用し、同図の半分の水域を計算対象範囲とした。

(2) 流体抵抗

スオンプ内での流動はマングローブの地上根や底生生物の巣穴等の抵抗を受けながら、流速を弱めて拡がる。また、クリークの水面降下に呼応してクリーク内へ収斂する。松田ら (1991) が指摘しているように、スオンプ内の流速は極めて小さく、層流的挙動を呈する可能性がある。そのために粗度係数で流体抵抗を議論するには問題が残るが、さしあたっては流体抵抗を底面摩擦項で表現することにする。Wolanski et al. (1990) はマニングの粗度係数nとして0.4 (M-S単位) を想定している。その値は、自然河川で従来から用いられている値よりも一桁大きい。松田ら (1991) はγ²Ui√(U²+V²)/hの表現を採用した場合にはn=0.4がγ²=4.0に対応することを示した。そこで、スオンプ水域のγ²の値を0.04~4.0の範囲で変化させて、感度解析を行った。なお、クリークでの値は0.0026を用いる。

(3) 水平渦動粘性係数

スオンプ内の流速が小さいことから、粘性項の影響は少ないと考えられる。Wolanski and Ridd (1990) が平面二次元モデルに0.2 m²/sを採用していることから、本計算では少し大きい値1 m²/sを採用した。実験に先立って、10⁻² m²/sを用いた計算を行なっているが、1 m²/sの計算結果と全く同じであった。クリーク内の渦動粘性係数は移流分散効果、密度効果等を十分に考慮して決める必要がある。本論文はスオンプの役割を基礎的に把握することを目的としているので、経験に基づいて移流方向には1 m²/s, 横断方向には10⁻² m²/sを採用した。

(4) 数値実験の結果

図-6は、スオンプがない場合(丸印)と、スオンプがありγ²=4.0場合(四角印)のクリークの河口中央での流

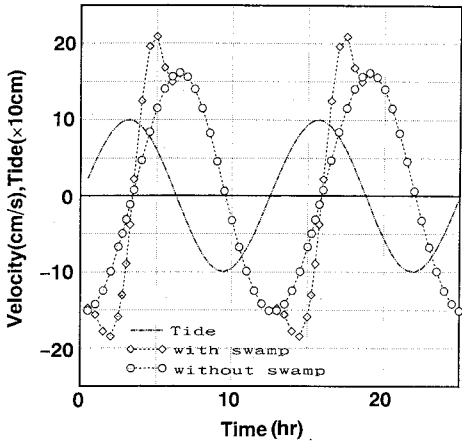


図-6 河口における潮位と流速の時間変化

速および潮位の時間変化を示す。流速は、+符号が外海への流出、-符号がクreek内への流入を示す。

一般に、スオンプがない場合に見られるように、流速は周期変動する潮汐変動に1/4周期の時間遅れで周期変動する。これに対して、クreek・スオンプ系においては、流入の最大流速から流出の最大流速まで3時間に変化するのに対し、逆の場合には9.5時間も要している。また、流速の最大値は流入側では18.5 cm/s、流出側では20.9 cm/sである。図-3の実測結果で指摘した流速分布の非対称性が数値実験においても確認された。いま一つ着目すべきことは流入・流出ともに最大流速の近くでピークが2度現れていることである。流出過程に着目すると、2回目のピークはスオンプがない場合の流速のピークと完全に一致している。したがって、1回目の流速のピークはスオンプが存在することにより生じているこ

とがわかる。また、この1回目のピークがスオンプの γ^2 の増加に伴って大きくなることから、スオンプの流速変動の非対称性に与える影響が予想できる。この1回目のピークは $\gamma^2=0.04\sim 0.4$ では4.5時間で生じているのに対して、 $\gamma^2=4.0$ では5.0時間になっている。このことからスオンプ内の γ^2 の増大にともなって、クreek内のピーク流速の発生時間にもずれが生じていることが分かる。

図-7はスオンプ水域内の横断面方向の水面形の時間変化を示している。横軸はスオンプ端からの距離を示し、縦軸はクreek底面から水面までの高さを表している。クreek内の水表面の増大にともなって、スオンプに海水が水面勾配を持ちながら侵入していくのが図-7に明瞭に現れている。3.25時間には8.4 mの水深に到達し、そこでの水面勾配は0である。その後、水面勾配は逆向きになり、上昇時よりも大きな水面勾配を呈しながら水位が下がることになる。図には示さないが、底部摩擦係数の増大にともない、水面勾配が大きくなっていく傾向にある。それにともないスオンプスからクreekへの流速も大きくなる。

図-8は河口から0.5 kmの地点でのクreekからスオンプへの流出(-符号)、およびスオンプからクreekへの流入(+符号)の横方向の単位幅流量を示している。計算結果は図-7に対応している。スオンプへの流入量と流出量の時間変化は潮汐周期 T の1/2時(正確には、6.25時間)で周期変動している。つまり、潮位が平均水位を越えてから $T/4$ 時間にスオンプスへ溢れた海水が残りの $T/4$ でクreekに戻る。したがって流出側の最大単位幅流量は $3/8 \cdot T$ 時付近(5.0時間)に生じ、これが図-7に現れたクreek内の流下方向流速の1回目のピ

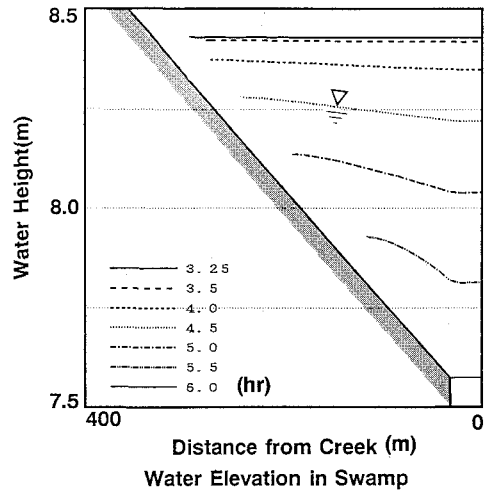
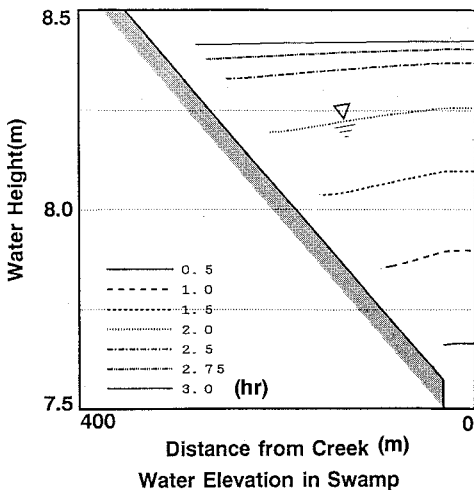


図-7 スオンプ水域の横断面の水面形の時間変化

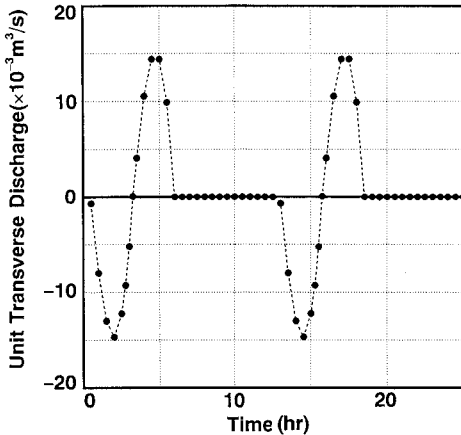


図-8 横方向の単位幅流量の時間変化

ークの出現に対応していることがわかる。また、渦動粘性係数を $10^0 \text{ m}^2/\text{s}$ あるいは、 $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ として計算した場合にもほとんど差異が認められなかった。但し、今の計算条件下においてはスオンプ内での流下方向への拡がりは計算されない。

以上のことから、マングローブ・クリークで観測される流速の非対称性は、下げ潮時にスオンプからクリークへ流入する流量と潮汐による周期変動の相互作用により引き起こされると考えられる。 $\gamma^2=0.04\sim 0.4$ では流出側の最大単位幅流量の出現は摩擦の減少により 4.5 時間にずれており、これは図-6 での議論と合致している。

6. あとがき

マレーシアの Sungai Merbok Estuary で観測された実測データを用いて熱帯や亜熱帯地域の入江や河口域で群落を形成しているマングローブ水域の物理過程を検討した。その結果、マングローブ水域では、スオンプの存在によって非対称な潮流の時間変化が生じていること

が分かった。このような現象は実測においても観測された。また、この現象はクリーク・スオンプ系を単純にモデル化した数値実験においても確認された。それは主としてスオンプ域への氾濫ならびにクリークへの再流入と潮流との位相の遅れによって生じることが分かった。

謝辞：本研究の実施に際しては平成 4・5 年度文部省科学研究費補助金・国際学術研究「河口域の流れと物質輸送過程の数値モデルの開発—亜熱帯性沿岸湿地帯への適用をめざして」(研究代表者：大阪大学・中辻啓二) ならびに British Council から研究助成を受けた。Dr. K. Siono を含む英国側研究者とは度重なる熱心な討議と協力を得た。本研究で用いたプログラム DIVAST は Falconer 教授により開発されたものである。また、現地観測データは Universiti Sains Malaysia の J. E. Ong 博士と W. K. Gong 博士から提供を受けた。現地で開催した日・英・馬の研究討論会では有意義な指摘を受けた。記して、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 松田義弘・佐瀬 旭 (1991): マングローブ水域の物理過程 (2), 日本海洋学会秋季大会, 概要集.
- Falconer, R. A. and Y. Chen (1991): An Improved Representation of Flooding and Drying and Wind Stress Effects in a Two-Dimensional Tidal Numerical Model, Proc. Instn. Civil Engrs, Part 2, pp. 659-678.
- Ong, J. E., W. K. Gong, Z. H. Din and B. Kjerfve (1991): Characterization of a Malaysian Mangrove Estuary, J. 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, The Ecology of Mangrove and Related Ecosystem, Ed. V. Jaccarini and E. Martens, Kluwer Academic Publishers.
- Wolanski, E., Y. Mazda and P. Ridd (1992): Mangrove Hydrodynamics, pp. 43-62, Tropical Mangrove Ecosystem, Ed. A. I. Robertson and D. M. Alogi, Springer-Verlag.