

周辺低湿地への氾濫を有するマングローブ感潮入江の流動特性

浅野 敏之*・園田 勝徳**・Shahbudin Saad***・Mohd. Lokman Husain****

1. はじめに

マングローブ水域は、河口に続く網状水路 (creek) とマングローブが群生する低湿氾濫原 (swamp) で構成され、高潮時に水路から低湿地に氾濫し、低潮時にはその水塊が水路へ流入することを繰り返す。この流動特性は、土砂堆積や洗掘などの物理環境を支配するばかりでなく、水質や水温の変化・栄養塩の流動を通じて化学・生物環境も支配する。最近、松田 (1997) はこうしたマングローブ水域の物理環境に関する研究成果の集成を出版している。

しかし、こうした特徴的な地形の下での入退潮を主因とする流動特性は、個別の地形特性・水理特性・生育するマングローブ樹の特性などに大きく依存するため、普遍的な知見にまでは至っていない。

本研究は、マレーシア・トレンガヌ州にあるマングローブ感潮入江で測定された現地データに基づいて、その流動特性を数値計算により検討したものである。

2. 観測地点の概要

観測地点はマレーシア半島東岸、クアラトレンガヌ市の南方約 170 km に位置する Kemaman 地区にあるマングローブ・エスチュアリーである。図-1 に示すように、マングローブ湿地帯は Kemaman 川、Chukai 川と呼ばれる 2 つの河川の合流域に面積 816 ha で広がっている。対象領域の水深は河川流軸部で 4~8 m であり、河口部の水深は約 12 m である。現地の潮汐は、平均潮差が 1.8 m であり、大潮の満潮時には潮位基準面から 2.6 m まで水位が上がる。このエスチュアリーの淡水流量は、モンスーン季 (11, 12, 1 月) には 500 m³/s、非モンスーン季には 80 m³/s である。

1999 年 5 月に現地において、音響測深器を用いた水深横断面測量ならびに流速・水温・塩分濃度の測定を、それぞれの河川に対して 18 個所の測点で行った。一方、陸

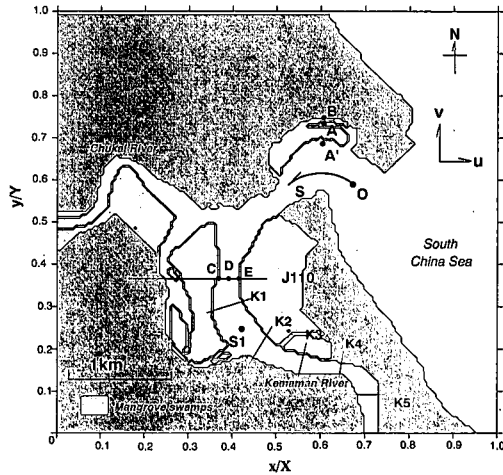


図-1 Kemaman Estuary における測定地点

上部においてはマングローブ樹木等の群生のために水準測量を行うことは困難であった。したがって、陸上部は実測の標高データを用いて計算することはできなかったが、現地は全体的に平坦な地形であり、氾濫域の標高を推定値で与えた場合でも大きな誤差は生じないと思われる。現地観測の詳細については、Asano ら (2001) を参照されたい。

3. マングローブ感潮入江の潮汐による流動の数値シミュレーション

3.1 基礎方程式

基礎方程式は以下の非線形長波方程式である。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f}{D^2} MQ - A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{f}{D^2} NQ - A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、(M, N) は x, y 方向の流量フラックス、η は水位変動、h は静水深、D は全水深 (D=h+η)、f は底

* 正会員 工 博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科
** 学生会員 鹿児島大学大学院 理工学研究科博士前期課程
*** Dr.Eng. Research Associate, Univ. of Malaysia Sabah
**** Ph.D Associate Professor, Univ. College Terengganu

面摩擦係数, $Q=(M^2+N^2)^{1/2}$, A_h は水平拡散係数である。

式(1), (2)の左辺第5項は, 底面摩擦とマングローブの支持根からなる形状抵抗項であり, 次式で表される(浅野・瀬戸口, 1995)。

$$f=f_b+f_{\text{root}}=f_b+\frac{1}{2}C_D\int_0^D d_0(z)N_{\text{root}}(z)dz \quad \cdots (3)$$

ここに, f_b は底面摩擦係数, C_D は抗力係数, d_0 はマングローブ支持根1本の投影直径, N_{root} は単位底面積あたりのマングローブの本数である。 d_0 , N_{root} は底面からの高さの関数であり, Sato (1978) をはじめ多くの観測結果が報告されているが, マングローブの樹種・樹齢・繁茂場所などによって異なる。

3.2 数値解析の概要

現地で測定された水深データに基づき, 図-1に示した4.3 km×4.3 kmの領域を280×280に分割し(格子寸法 $\Delta x=\Delta y=15.4$ m), 潮汐による入退潮流の数値計算を行った。時間ステップは $\Delta t=7.5$ sとした。swamp エッジを移動境界として氾濫状況を再現する計算を行った。図-1の右端を沖側境界とし, 潮汐による水位変動を振幅 $a=1.0$ m, 周期12 hrの正弦波で与えた。沖側境界および河川上流側では後退特性曲線を通過させることによる無反射境界処理を施した。計算された水位変動の時間波形を調べたところ, 計算領域の境界近傍においても潮汐変動に数値的な反射は見られず, この無反射処理が良好であることを確認した。

3.3 マングローブ支持根による流体抵抗の評価

本解析ではマングローブの蟄足状の支持根による流体抵抗を, 式(3)に基づいて評価する。そのために, 図-1の河口付近のB点付近でマングローブ支持根の形状を実測した。現地の樹種は *Rhizophora stylosa* (ヤエヤマヒルギ類) である。測定項目はマングローブ樹1本あたりの支持根数 n , 根長 l , 周囲長 p である。周囲長は図-2の模式図に示すように, 1つの支持根あたり3カ所で計測した。現地で密生したマングローブ支持根の測定は容易ではなく, 測定したマングローブ樹の本数は7本にとどまった。表-1に測定結果をまとめた。

上記の支持根の現地測定値から f_{root} の推定を行う。まず, 支持根の直径 d_0 は周囲長 p から円形断面を仮定すると $d_0=4.8$ cmを得る。支持根の植生密度は, マングローブ一本あたりの支持根数 $n=10.3$ 本より, 推定値として $N_{\text{root}}=10$ 本/m² とする。*Rhizophora* の支持根の形状特性は, 図-2に模式的に示したように, 幹から分岐した支持根からさらに2次根・3次根が分岐することが多い。表-1で示した支持根数 n は1次根のみの測定された本数である。上述の N_{root} の推定値を大きめに見積もったのは2次根以上の本数を考慮したことによる。また, 支持根は h_m なる高さからほぼ一斉に分岐し, 分岐した後はそ

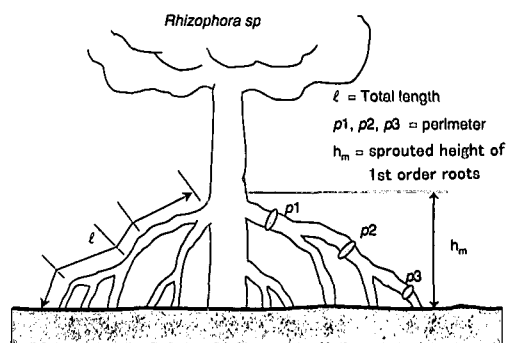


図-2 *Rhizophora stylosa* の支持根形状の模式図

表-1 支持根形状の測定結果

Tree No.	number of prop roots n	average roots' length $\bar{l}$ (m)	average roots' perimeter $\bar{p}$ (m)
1	10	1.37	0.15
2	9	1.49	0.13
3	6	1.57	0.13
4	9	1.49	0.15
5	11	1.51	0.12
6	11	1.40	0.14
7	16	1.35	0.13
Average	10.3	1.45	0.14

の直径は地盤からの高さによってあまり変化せず一定値に近い。したがって, 式(3)で計算される f_{root} は水深 D が分岐高さ h_m より低い限り z によらず一定と見なせる。これら d_0 , N , C_D の値を与えてやると, $f_{\text{root}}=0.24D$ を得る。これは, マニングの粗度係数 n に換算すると, $f=2gn^2/\sqrt{D}$ より水深 $D=1$ m で $n=0.11$ (m, s 単位) に相当する。

Chow (1959) は, 様々な状態の開水路に対してマニングの粗度係数 n の標準値と上限・下限値を示している。それによれば, 夏期の灌木が生い茂る氾濫原での n は, 標準値が $n=0.10$ で $n=0.07\sim 0.16$ の範囲を有している。現地のマングローブ植生の状態に照らして考えれば, 上記で計算された $n=0.11$ はこの提唱された値とよく符合すると考えられる。

以上の考察より, 氾濫原の上のマングローブ支持根群による摩擦係数は $f_{\text{root}}=0.24D$ とし, creek と swamp 両者に対して底面摩擦係数 $f_b=0.01$ として計算した。

4. 計算結果ならびに考察

4.1 隣接する creek 間での越流状況

図-3はJ110断面上での水位変動を示したものである。ここで, 図-1の計算領域の各点には格子番号(I1～I280, J1～J280)を割り振っており, J110断面は図-1に示すように x 軸に平行な断面となる。現地は複数の

creek に分岐しており、同じ横断面上でも河口からの流軸距離が相違するために、隣接する水路間で水位に差異が生じる。図-3 では、水位が最大となる $t=20$ hr 付近で、左側の隣接する 2 つの小 creek 間で越流が起きている。一方、左側の creek では $t=18$ hr 付近で水位が最大となっている。

4.2 水位変動・流速に及ぼす swamp への氾濫の影響

河口部 (図-1, A 点付近) ならびに当該計算領域水路部中央にあたる J110 測線での swamp への氾濫が計算結果に及ぼす影響を考察する。そのために、水域から陸域への氾濫を考慮した計算と、氾濫を許容しない計算結果を比較して示す。また、計算結果がどの程度周期的な定常状態に近づいているかを示すために、2 周期分の結果を示した。

図-4 は、河口部の A 点における水位変動の時間波形を示したものである。氾濫を許容した計算結果は、許容しない計算結果より水位の極大値が小さくなっており、これは swamp への氾濫の効果が見てとれる。本川側の swamp エッジに近い点 A' においても、同様に氾濫の影響で水位ピークの低減効果が見られるが、低減の大きさは A 点におけるものより小さい。

図-5 に水粒子速度の東西方向成分 u の時間波形を示す。上段の図は、creek 内 A 点での結果、下段は A 点より 4 メッシュ分 swamp 内に入った点 B での結果である。前者の結果を見ると、氾濫によって流速のピークは遅れ、氾濫を許容した流速波形は許容しない波形より全体的に後ろにシフトした結果となっている。また後者の結果では、氾濫流の流速は小さい。氾濫を許容しない計算結果は当然ながら流速 0 となる。

図-6 は同じ点における水粒子の南北方向成分 v の分布である。図-5 と同様、氾濫を考慮した場合はピークの出現時間が遅れ、全体に後方にシフトした形状となるとともに、ピークは先鋭な形状となっている。

図-7 は図-1 に示した J110 断面上での水位変動 η を

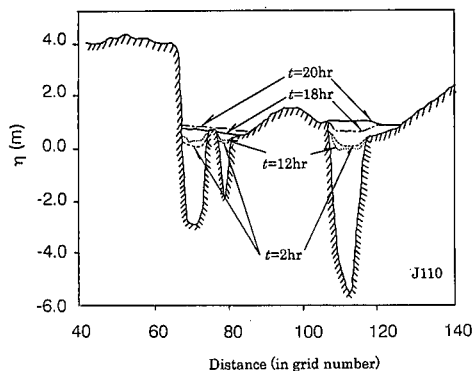


図-3 隣接する creek 間での越流状況

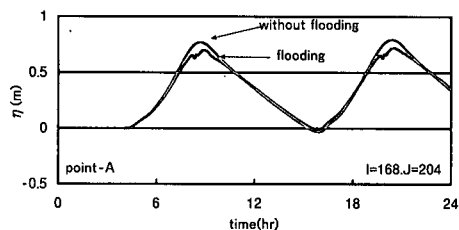


図-4 水位変動波形

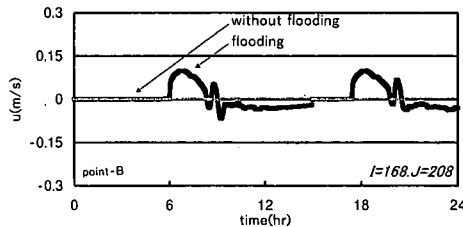
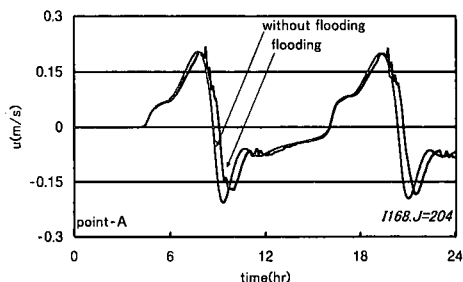


図-5 東西方向流速成分 u の時間波形

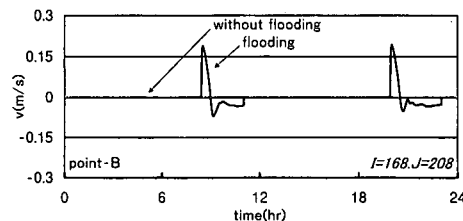
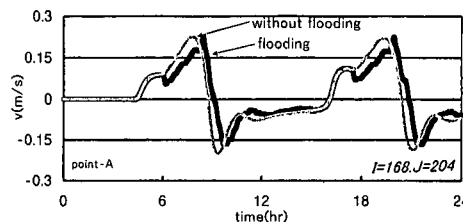


図-6 南北方向流速成分 v の時間波形

示したものである。この結果は swamp エッジに近い C 点の波形である。氾濫の影響によってピークがわずかであるが減少している。

図-8 は東西方向流速成分 u に関する結果であるが、

水路はここではほぼ南北方向となっているので、 u は主流とほぼ直交する成分となる。上段の図は、水路中央部のD点、下段の図は右岸のswampエッジに近いE点の結果である。流速変動波形は、氾濫の影響で擾乱が見られ、やはりピークの出現時刻は氾濫を許容しない結果より遅れが見られる。swampエッジに近いE点の結果では流速波形は正弦波形より大きく歪んだ形となる。

図-9は南北方向流速成分 v に関する結果で、この地点の地形から v は水路主流成分に相当する。上段の図は水路左岸のC点、中段は水路中央部のD点、下段はswampエッジに近いE点の結果である。氾濫を考慮した計算結果では極大値がわずかに小さくなっていることがわかる。なお、左岸側のC点では右岸側のE点より大きな流速となっており、湾曲流の性質が認められる。

4.3 水位・流速変動に及ぼすマングローブ支持根の抵抗の効果

swamp上に群生するマングローブの支持根によって氾濫した流れは抵抗を受ける。このswamp上の低流速域の形成は、水平混合によってcreek内の流れをも減速させることが予想される。そこで、上記の効果を調べるために、マングローブの抵抗 f_{root} を式(3)を用いて考

慮した場合と、マングローブが群生しない状態を想定した $f_{\text{root}}=0$ と置いた場合の計算結果を比較した。

図-10は、 $J=110$ 断面における水路中央部のD点における水位変化 η 、図-11, 12はそれぞれ $J=110$ 断面右岸側のswampエッジに近いE点における東西、南北方向流速 u , v の計算結果である。これらの結果から注目されるのは、氾濫原にマングローブが群生している状態の結果の方が、水位・流速のピーク共にわずかではあるが、大きくなっていることである。これは、当初予想したマングローブ支持根の流速減速効果とは逆の結果が生じていることになる。

この原因を調べるために、マングローブ支持根が有る場合と無い場合の河口付近での氾濫状況を比較した。図-13は、沖側境界で潮汐を与えて18時間40分後の氾濫状況を示したもので、左側がマングローブ支持根の流体抵抗を考慮した場合、右側が無視した場合である。マングローブ支持根が無い状態では流れに対する抵抗が底面摩擦のみで小さくなるために、氾濫流が河口近くのswamp領域内の奥まで侵入していることがわかる。この氾濫水の拡がりや領域内部に位置するcreek内に流入する水量を減少させ、上述の結果となったと考えられる。

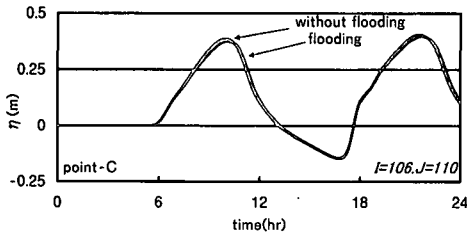


図-7 J110断面における水位変動波形

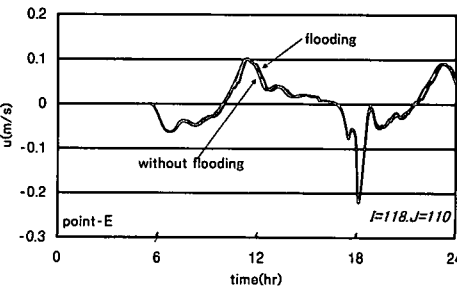
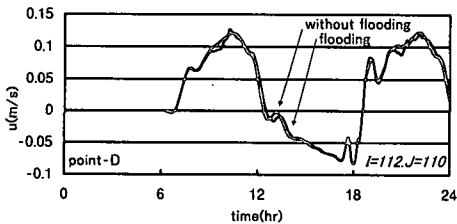


図-8 J110断面における東西方向流速 u の時間波形

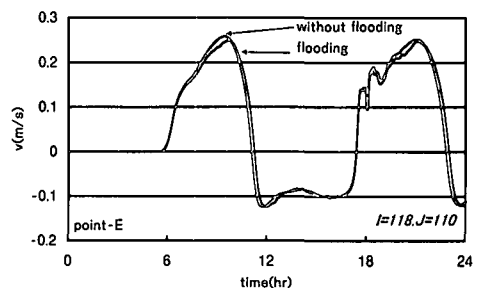
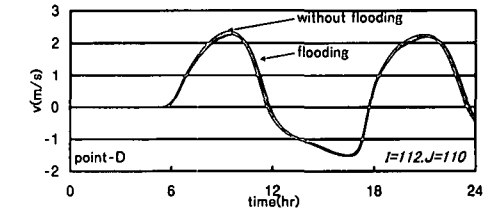
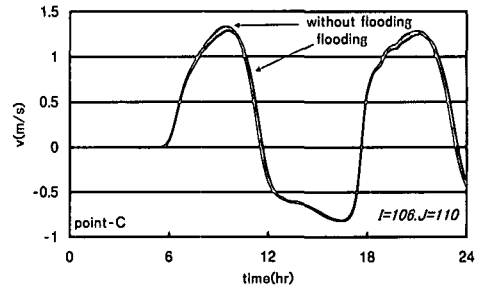


図-9 J110断面における南北方向流速 v の時間波形

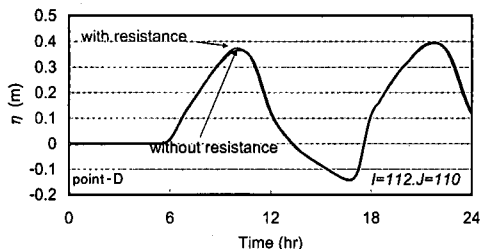


図-10 J110 断面における水位変動の時間波形

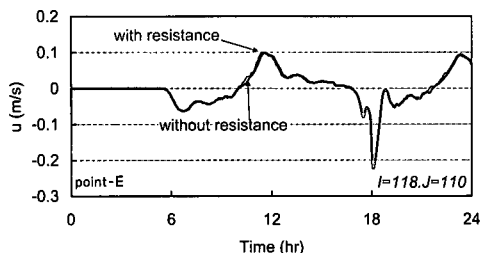


図-11 J110 断面における東西方向流速 u の時間波形

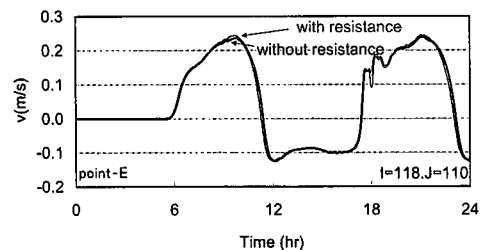


図-12 J110 断面における南北方向流速 v の時間波形

5. 結 論

本研究は、マレーシア半島東岸に位置するマングローブ感潮入江内の現地観測結果に基づき、潮汐流の数値シミュレーションを行ったものである。その結果、

(1) 低湿地への氾濫を許容しない計算結果との比較から、低湿地への氾濫によって、creek 内の流速変動のピーク値の出現が遅れ、波形が全体的に後ろにシフトする結果が得られた。また、氾濫によって水位や流速の極大値もわずかではあるが減少することがわかった。

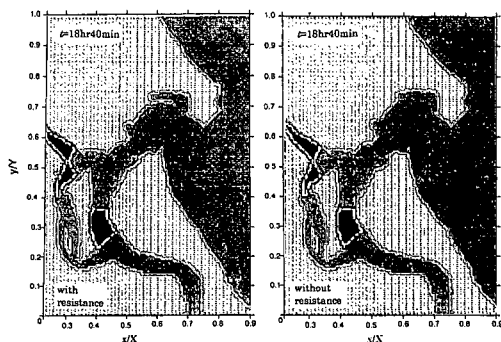


図-13 氾濫を許容した場合と許容しない場合の氾濫水の拡がりの比較

(2) 低湿地内にマングローブの支持根が無いとした仮想的な計算結果との比較から、マングローブ支持根の流体抵抗を考慮した方が、逆に creek 内の水位と流速変動のピーク値はやや増加する結果となった。この理由は、支持根の流体抵抗によって、河口付近の氾濫流の拡がりが抑制され、creek 内に流入する水塊が増大するためであることがわかった。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、平和中島財団「アジア地区重点学術研究」による研究費の補助を得たことを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 浅野敏之・瀬戸口喜祥 (1995): 狭小水路と氾濫原で構成されるマングローブ感潮入り江の流動特性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 401-405.
- 松田義弘 (1997): マングローブ水域の物理過程と環境形成, 黒船出版, 196 p.
- Asano, T., S. Saad and M. Lokman Husain (2001): Hydrodynamics in a mangrove fringed estuary, Coastal Engrg. Jour. (submitted).
- Chow, V. T. (1959): Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill, 680 p, pp. 101-123.
- Sato, K. (1978): Studies on the protective functions of the mangrove forest against erosion and destruction (III), The Sub-Tropical Forest, Vol. 3, pp. 40-59.
- Mazda, Y., E. Wolanski, B. King, A. Sase, D. Ohtsuka and M. Magi (1997): Drag force due to vegetation in mangrove swamps, Mangroves and Salt Marshes, Vol. 1, No. 3, pp. 193-199.