

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

浅野 敏之*・瀬戸 口 喜祥**

1. はじめに

藻場・塩性湿地のヨシ原・マングローブ林などの沿岸域植生群落は、水質浄化能力・後背地の海岸保全・魚鳥類の飼集の場として、最近その環境上の価値が注目されている。マングローブ林は熱帯・亜熱帯沿岸の浅海域・汽水域に分布し、わが国ではその95%が沖縄、特に西表島・石垣島に集中している(佐藤, 1992)。鹿児島県奄美大島の西仲間地区にも住用川・役勝川の合流する河口部にメヒルギを中心とする約73 haのマングローブ林があり(図-1)、特別保護区に指定されている。

マングローブ水域の生物環境・水質環境を理解するためには、その基盤である物理過程を明らかにすることが必要である。マングローブ水域は地形的に河口に続く水路(creek)とマングローブが群生する低平湿地(swamp)で構成され、上げ潮時に水路から低平地に氾濫し、下げ潮時に水路に流入する流動特性を繰り返す。底質土壌は泥質で表面は植物の枯死体で形成される。こうした特異な外力条件・地形条件の下での物理過程は、従来の海岸工学であまり対象とされなかったため十分に解明されていないのが現状である。

本研究はマングローブ群落を粗度としてモデル化し、潮汐変動による植生繁茂域の流れについて数値実験を行い、水域に特有の流動特性を検討したものである。今回の計算ではマングローブ群落の粗度機能を明らかにすることを目的とし、単純化された入江における流動特性を検討した。

2. 粗度機能としてのマングローブの形状特性

2.1 支持根の本数と底面からの高さとの関係

マングローブは熱帯・亜熱帯の河口の湿地帯や沿岸部の干潟に生育し、潮汐によってある時間冠水される湿地に生育する好塩性の樹木の総称である。マングローブの生育基盤は泥質である上、潮の干満による流れで不安定な立地条件下に生育するために、その根を鰐足状に分岐させて自らを支えている。

流れに対する粗度機能に着目すれば、マングローブの形状は図-2のようにモデル化できる。粗度機能は支持根の直径 d 、植生密度 N (単位面積当たりの支持根の本数 n)で表現できると考えられ、それらは底面からの高さ z の関数である。図-3はSato(1978)が西表島船浦と石垣島吹通川のヤエヤマヒルギの分布地で測定した、

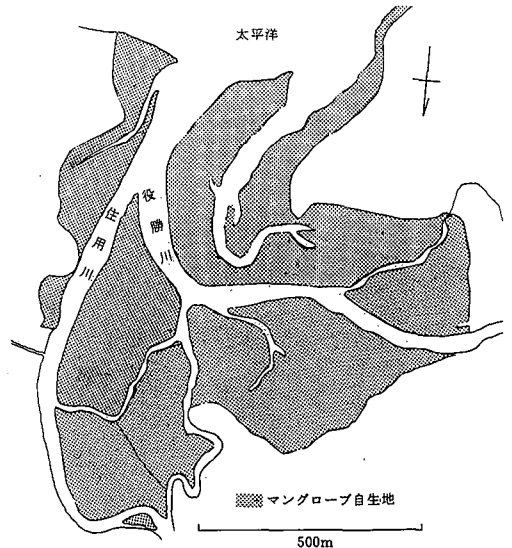


図-1 奄美大島のマングローブ林

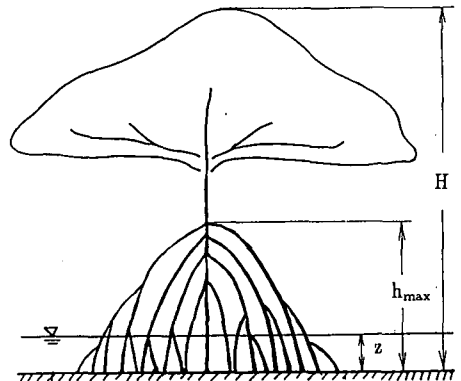


図-2 マングローブ支持根の形状のモデル化

* 正会員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科

** 学生会員 鹿児島大学大学院 工学研究科

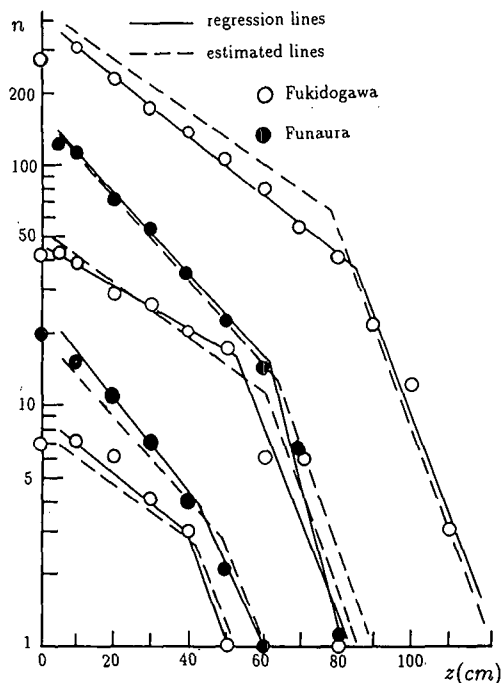


図-3 マングローブの根数 n と底面からの高さ z との関係 (Sato, 1978)

底面からの高さ z と支柱根の本数 n との関係を示したものである。Sato (1978) によれば、 n の対数と z の関係は図のように途中で折れ曲がり点 h_c を持つ 2 本の直線で表される。この h_c は支持根の出る最高点の高さ $h_{\max}$ と次式の関係がある。

$$h_c = 0.58 h_{\max} + 0.083 \quad (1)$$

H を樹高とすると n は z, h_c, H と次の関係で結ばれる。

$$n = 0.15 \exp[1.55H - 4.0z] \quad 0 < z < h_c \quad (2)$$

$$n = 0.15 \exp[1.55H + 5.5h_c - 9.5z] \quad h_c < z < h_{\max} \quad (3)$$

上式で $h_c, h_{\max}, H, z$ は m 単位で表している。Sato (1978) の論文では回帰係数は泥面の土質や粒度によって変化するとしている。上式中の係数には西表島船浦の調査結果の値を採用した。

2.2 粗度係数の定量的評価

前述のようにマングローブの支持根は底面に近づくほど分岐するため、氾濫原の水位が増せば粗度として機能する支持根の本数が変化することになる。swamp 内において潮汐による流動を定常流と見なし、水位勾配 dh/dx による力と支持根群の抗力が釣り合う条件より、

$$-\rho g \frac{dh}{dx} = \frac{\rho}{2} C_D N(z) d_0 u(z) |u(z)| \quad (4)$$

が得られる。ここに ρ は水の密度、 g は重力加速度、 C_D は支持根の抗力係数、 N は単位面積当たりの支持根数(植生密度)、 d_0 は単位鉛直長さ当たりの投影面積であり、円

形断面であれば直径 d と一致する。 $-dh/dx = I$ とおき、上式を変形すると次式となる。

$$u(z) = \sqrt{\frac{2gI}{C_D d_0}} \frac{1}{N(z)} \quad (5)$$

式 (2), (3) で示したように、 $n(z) \sim N(z) \sim \exp(-z)$ であったから $u(z) \sim \exp(z/2)$ となり、マングローブ林内では底面に近づくにつれて指数的に流速が低下し浮遊底質の沈澱機構が説明される。

swamp 内の断面平均流速 v は、

$$v = \frac{1}{h} \int_0^h u(z) dz = \sqrt{\frac{2gI}{C_D d_0}} \frac{1}{h} \int_0^h \sqrt{\frac{1}{N(z)}} dz = \sqrt{\frac{2gI}{C_D d_0}} \frac{1}{N_*} \quad (6)$$

となる。上式を Manning の公式

$$v = \frac{1}{C_{\text{man}}} R^{2/3} I^{1/2} \quad (7)$$

と比較すると swamp 内の粗度係数 C_{man} は

$$C_{\text{man}} = R^{2/3} N_* \sqrt{\frac{C_D d_0}{2g}} \quad (8)$$

で表される。

3. creek-swamp 系の数値計算

3.1 creek-swamp 一体型モデル

ここではマングローブ入江を図-4 のように、氾濫原 (swamp) の斜面勾配 α 、水路 (creek) の流れ方向の水路幅収縮角 β を有する 1 次元 creek-swamp 系でモデル化した。潮汐の時間スケールを持つ流れが creek から swamp へゆっくり氾濫していく現象を想起すると、同一断面での creek と swamp の水位差はないと考えられる。またマングローブ林内での流速は小さく、実質的には死水域に近いとしてここでの流体運動は無視できる。そこで swamp への浸水を連続式で考慮し、運動方程式は creek 断面内でのみ考慮する (Wolanski, 1985)。このような creek-swamp 系の 1 次元非定常流の方程式は次

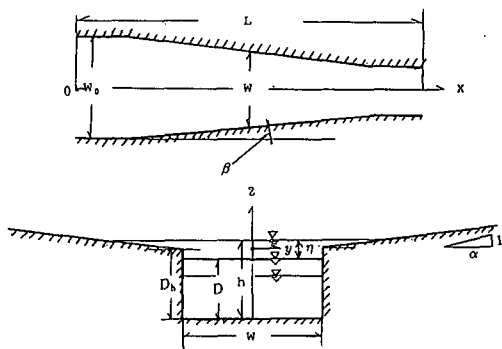


図-4 マングローブ入江の 1 次元モデル

式となる。

$$\frac{\partial(A+M)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial c_2 Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_1 Q^2}{A} \right) + c_3 g A \frac{\partial h}{\partial x} + g A S_f - g A S_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 Q は流量、 A はcreekの断面積・ M はswampの断面積で、水路幅 W 、水路の静水時水深 D 、水路の深さ D_h 、水位変動 η 、swampの斜面傾斜角 α を使って次のように表される。

$$A = (D + \eta)W, \quad M = \alpha(D + \eta - D_h)^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

また S_f は摩擦勾配でマンニングの粗度係数 C_{man} 、径深 R を使って次式で計算される。

$$S_f = C_{man}^2 |Q| |Q| / A^2 R^{4/3} \quad \dots\dots\dots (12)$$

マングローブ入り江の縦断底勾配 S_0 は一般に小さいので本計算では $S_0=0$ とし、エネルギー係数 c_1 、運動量係数 c_2 、圧力分布補正係数 c_3 は簡単のためすべて1とした。式(12)において C_{man} は後述する合成粗度係数で与えた。

計算条件には奄美大島役勝川河口の地形を参考に、水路長 $L=10$ km、河口での水路幅 $W_0=40$ m、静水深 $D=1.5$ m、水路の深さ $D_h=2.0$ m、swampの斜面勾配 $\alpha=40$ 、水路幅収縮角 $\beta=1/500$ を基本条件として採用した。この水路に振幅 $a=0.4\sim 1.4$ m、周期 $T=12$ hrの潮汐変動が進行する場合を取り扱う。

数値計算は断面積・水位と流量を時間ステップごとに交互に求める leap-frog 法によった。下流端(河口入口)で潮位変動を与えると同時に、上流端では日野・仲座(1987)が提案した仮想固定壁上で水位0と流量0の反射条件の結果を重ね合わせる開放境界スキームを採用し、潮汐の伝播を自由に通過させるようにした。

3.2 合成粗度係数の評価

2.2では氾濫原上のマングローブ群落の粗度係数を、支持根の本数 n 等の関数として式(8)で評価した。しかし、この値はswampに対するものであり、creek-swamp系の計算にはcreekの部分も併せた合成粗度係

数 $\bar{C}_{man}$ を用いる必要がある。ここでは複断面河道の合成粗度係数の評価法である断面分割法を利用する。まず、合成径深 $\bar{R}$ を全河積 $A=\sum A_i$ を用いて、

$$\bar{R} = \left(\frac{\sum A_i R_i^{2/3}}{A} \right)^{3/2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

で求め、

$$\bar{C}_{man} = \frac{A \bar{R}^{2/3}}{\sum \frac{A_i R_i^{2/3}}{C_{man,i}}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

から $\bar{C}_{man}$ を算出する。

図-5は潮汐変動がswampに氾濫してきた場合の、合成粗度係数 $\bar{C}_{man}$ の変化を計算したものである。図に示すように水位 z とともに氾濫原が広がるために $\bar{C}_{man}$ は増加するが、ある水位を過ぎると支持根の本数が減少し、 $\bar{C}_{man}$ も減少することがわかった。この合成粗度の算定法ではcreek内とswamp内で独立にマンニングの抵抗則が成立することを仮定している。式(8)で計算されるswamp内の C_{man} はcreekのその2オーダー大きい値となりうるが、流速が小さいため式(14)の全通過流量・全断面積・合成径深の関係から得られる $\bar{C}_{man}$ は、creekの C_{man} と大きな差のない結果となる。

福岡ら(1992)は断面分割法による粗度係数が実測値と相違する理由として、高水敷の樹木群内の遅い流れが

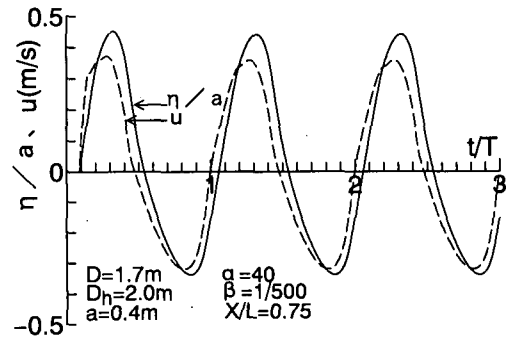


図-6 水位変動 η と流速 u の時間波形

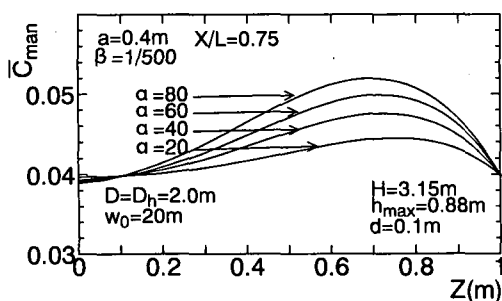


図-5 水位 z と合成粗度係数 $\bar{C}_{man}$ の関係

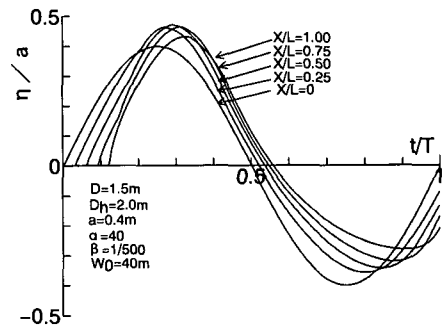


図-7 水位変動 η の時間波形

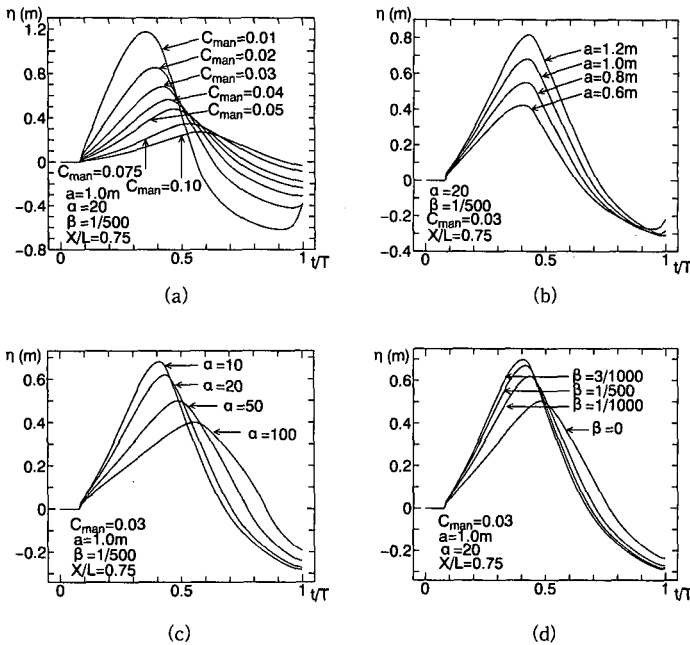
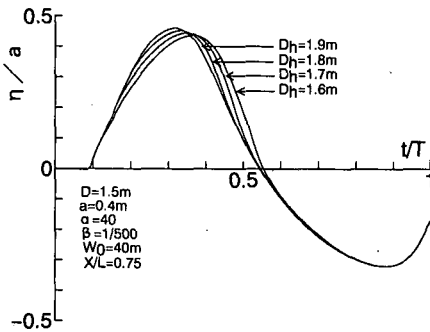
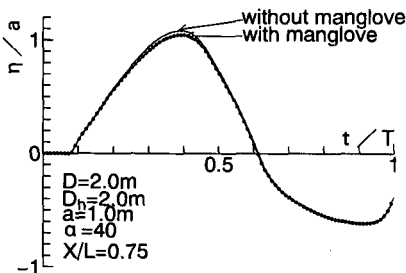
図-8 水位変動 η に及ぼす形状パラメーターの効果図-9 水位変動 η に及ぼす溢水の影響

図-10 水位変動に及ぼすマングローブ支持根の粗度効果

ではこれらについては考慮していない。
合成粗度係数の評価の高精度化は今後の
課題である。

4. 計算結果ならびに考察

図-6 に水位 η および流速波形 u の時間波形を示す。ここでの計算条件は $D_h = 2.0$ m, $D = 1.7$ m, $a = 0.4$ m で、水位が上昇すると一部の位相で氾濫する条件であるが、 $X/L = 0.75$ という上流端近くにおいても波が反射することなく通過する結果が得られている。他の計算条件・縦断位置においても同様に無反射条件が満たされることが確認された。図-7 には水路の5個所の縦断位置における時間波形を示した。本計算では図-4のような横断形状を持つと同時に、潮汐変動が水路を遡るにつれて幅が漸縮する入江を対象としている。図-7 に示した波形の変化には様々な地形の影響が入ると考えら

れるので、次に計算条件を固定し個々のパラメーターを順次変えて、結果に与える影響を調べる。

図-8(a) は合成粗度係数 $\bar{C}_{man}$ を変化させた結果であり、 $\bar{C}_{man}$ の増加とともに波高減衰のみならず波形の伸長が見られることがわかる。図-8(b) は潮汐変動の初期振幅 a をパラメーターとした結果である。基礎式 (10) の左辺第2項に非線形項を含むため、 a の増大とともに峰位相の波形が尖鋭化する。図-8(c) は氾濫原の勾配 α を変化したもので、swamp の勾配が緩くなると溢水により峰部の波形が扁平化するとともに極大値の位相が遅れることがわかる。図-8(d) は水路幅の収縮率 β を変えた結果であり、 β が大きいほど水路幅の狭まりにより潮汐エネルギーが収束し波高増大の結果となる。なお、図-8 では粗度係数は水位変動によらず水路全体を通じて一定 ($C_{man} = 0.03$) として計算を行った。

以下ではマングローブの粗度効果を水位の関数として考慮した計算結果を示す。図-9 は swamp への溢水を再現させるために、静水時水深 D を一定として水路深 D_h を変化させた計算結果である。 D が D_h に近づくにつれ溢水により水位のピークが遅れ、それに起因して波形自体が後傾していく。流速波形もこの結果とほぼ同形になる。松田 (1992) はオーストラリアにおける流速観測から、上げ潮流に比して下げ潮流が強くなり、creek 内での底泥を外海へ運び去り河口閉塞を防ぐ機構となり得ると述べるとともに、簡略な2次元数値モデルによってこの特性を再現している。中辻ら (1994) も平面2次元数値モデルによって氾濫水の swamp 内への貯留効果によつ

周辺部の速い流れと混合することによって低水路流れを減速させる機構や、樹木群境界 (図-4 の $y = \pm w/2$) で生じるせん断応力を考慮する必要を挙げている。本計算

て同様な流速波形の非対称性が得られることを報告している。本計算では基礎式に含まれる非線形項の効果により、むしろ上げ潮流が下げ潮流より卓越する結果となった。松田も氾濫域の形状と底面摩擦の特性によっては流速波形の非対称性が見られなくなるとしているが、今後はモデル中に水路横方向の流動を考慮してゆく必要がある。

図-10 はマングローブによる粗度効果を考慮した場合と、考慮しないで水路全体が $C_{\text{man}}=0.01$ の粗度係数を有する場合の比較を示したものである。creek の幅をこれより狭くしたり、swamp の傾斜角 α を緩くすれば、両者の差はもっと明確になるであろうが、奄美大島の現地に近い条件下では図に示すように水位変動に小さな差異を与えるのみであることがわかった。

5. 結 び に

creek-swamp 系を一体として取り扱う 1 次元モデルにより潮汐による流動特性を考察した。地形条件を単純化してパラメータ化し、それらの諸量が流動特性に及ぼす効果を調べた。さらにマングローブ支持根の形状特性を考慮して、氾濫水位とともに変化するマングローブ林の粗度効果を算定した。

数値解析の結果、swamp の勾配が緩くなるとともに、また静水時水深が creek の深さに近づくにつれ、溢水によって水位のピークが遅れ水位波形が後傾してゆくことがわかった。またマングローブの粗度効果は、ここで想定した現地地形に近い条件下では、上げ潮時の水位変動を若干低下させるのみであった。今回の 1 次元解析では

流速波形に下げ潮流速の卓越は見られなかった。数値モデルの水平 2 次元への拡張や、creek 内と swamp 内の大きな流速差に起因する水平混合の取り込みについては今後の課題としたい。

最後に本研究を行うにあたって、鹿児島大学援助会による研究費の援助を受けたことを付記するとともに、奄美大島のマングローブ林調査に際してお世話になった鹿児島県大島支庁・瀬戸内土木事務所の方々に謝意を表する。

参 考 文 献

- 佐藤一紘 (1992): マングローブ林, 日本の海岸林, ソフトサイエンス社, pp. 226-237.
- 中辻啓二・伊藤 渉・村岡浩爾・F. 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.
- 日野幹夫・仲座栄三 (1987): 数値波動解析における新しい無反射境界スキームの平面 2 次元問題への適用, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 262-266.
- 福岡捷二・藤田光一・新井田浩 (1992): 樹木群を有する河道の洪水水位予測, 土木学会論文集, No. 447, II-19, pp. 17-24.
- 松田義弘 (1992): マングローブ水域の環境保全と物理過程解明の基礎研究, 一クリークにおける潮流の非対称性について, 東海大学総合研究機構, Vol. 15.
- Sato, K. (1978): Studies on the protective functions of the mangrove forest against erosion and destruction (III), On the numerical distribution of the prop roots of *Rhizophora stylosa* tree in Okinawa, The Sub-Tropical Forest, Vol. 3, pp. 40-59.
- Wolanski, E. (1985): Numerical Modelling of Flows in a Tidal Creek-Mangrove Swamp System, Proc. of 21st IAHR Congress, pp. 82-85.