

潮汐流場のマングローブの環境機能に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ENVIRONMENTAL FUNCTIONS ON MANGROVE FOREST UNDER TIDAL CURRENT

武村武¹・秋田知広²・有田正光³

Takeshi TAKEMURA, Tomohiro AKITA and Masamitsu ARITA

¹正会員 博(学) 東京電機大学 助教 理工学部建設環境工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

²学生会員 東京電機大学大学院理工学研究科 建設環境工学専攻(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

³正会員 工博 東京電機大学 教授 理工学部建設環境工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

In this paper, experimental results to reveal the characteristics of open channel unsteady flow influenced by tide in emergent vegetation such as mangrove forest were presented. The experiments were carried out using water channel in which tidal current generator was settled at downstream end. The vegetation model was made imaging *Rhizophora stylosa* which was well observed at Okinawa region. The velocity measurements and flow visualization of unsteady flow were conducted in the experiments. The features of tidal unsteady flow appeared at estuaries were verified to be reproduced in the experimental flume. The Measured horizontal velocity profiles and triggered large scale horizontal vortexes observed in the experiments were confirmed to be different from the results of steady flow cases which reported by previous researches.

Key Words : mangrove, creek, tidal current

1. はじめに

定常流れ中の植生周りの流れ特性については多くの研究者により理論的・実験的な研究が実施されてきている¹⁾²⁾。例えば、河道内に繁茂する代表的植生であるヨシやヒメガマなどの大型抽水植物群落を念頭に置いた上で開水路の定常流中に正方格子状、千鳥格子状もしくは不規則に配置した円柱群を配置し、流れの運動量損失や、植生との境界部に発生する大規模水平渦の観察などの研究が実施されてきた³⁾⁵⁾。また、短周期の非定常流れの中の植生周りの流れ特性に関する研究としては波動場に関するものが多い。例えば、海岸付近の沈水植物である海藻群落場において、波動に起因する海藻周りの流れ特性や、底質の浮遊・堆積特性等について多くの検討がなされてきている⁶⁾⁸⁾。

一方、長周期の非定常流れである潮汐流の影響を受ける植生帯の代表例としては熱帯や亜熱帯地域の感潮域に生育するマングローブ林があげられる。近年、マングローブ林の持つ環境機能が着目され、多くの現地観測によりその実態が明らかにされつつある⁹⁾。しかし、潮汐流とマングローブ林の干渉など、流動のメカニズムに関する実験的検討はほとんど行われていない。マングローブは多くの気根を持つために流れに対して強い抵抗となり、マングローブ林内の流速は大きく低下する。これに

より豊富な有機物が土壌に供給され、水産生物の産卵場、幼稚仔の保育場など、生態系サービスの場を提供するばかりでなく、河床の泥土の移動を減少させる事による洗掘防止機能、さらには波からの浸食防止などの防災機能をも有している⁹⁾¹⁰⁾。この様な、さまざまな機能を持つマングローブ林を保全するためには、現地観測に頼るのみではなく、現象を単純化した実験的検討により潮汐流とマングローブの樹林地帯の干渉に関する基礎的メカニズムを把握することが重要であると考えられる。

感潮域のマングローブ林はその樹林地とその間を縫って潮汐流が流れる水路部から構成されており、全体をマングルとよんでいる。マングルの形態はR型(Riverine Forest Type)、B型(Basin Forest Type)、F型(Fringe Forest Type)に分類されている⁹⁾。これらの中でマングルの発達レベルが最も高いR型マングルでは、マングローブは満潮時に樹冠を残して全体が海面下に水没するが、干潮時には底泥を露出させた樹林地(植生領域)と水路部(非植生領域)から構成されるようになる。また、樹林地内の地形勾配は極めて緩く、その中の水路は支流が分岐しながら複雑に蛇行して樹林地の奥にまで達している。

本研究ではR型マングルを念頭に置いた上で潮汐流とマングローブ林の干渉を実験的に再現し、流動のメカニズムと環境機能に与える影響の基礎的特性を検討することを目的とする。

2. 流れの場と流動に関する基礎理論

現地のマンガルの平面形状は複雑であるが、以下で使用する潮汐流に伴う非定常流動を単純化したモデルによる実験を念頭に置き、流れの場の基礎的な流動に関して理論的に考察する。

現象の単純化のために図-1に示すようなR型マンガルの奥部の上流端が陸地となっている水平床の水路について考える。ここでは樹林部の存在を考慮しない場合の水路内の断面平均的な流動の特性について考察する。なお、下流端はより大型の水路もしくは海域に接続していると考え、そこでの潮位を境界条件として与える。また、水路長 L の水路の水深 h は水路全長に渡って、潮汐に応じて一様に変化するものとする。さらに、潮汐により変化する水深 h を正弦曲線で模擬することとし、平均水深 h_0 、潮位振幅 a として式(1)で与える。

$$h = h_0 + a \sin \omega t, \quad \omega = 2\pi / T \quad (1)$$

ここに、 t は経過時間、 T は潮汐の周期、 ω は角速度である。また、連続の式は下流端から上流に x 、河床から上向きに z をとると式(2)で与えられる（図-1参照）。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここに、 q は水路内の流れの単位幅流量である。

式(1)を考慮した上で式(2)を $x = L$ (水路上流端)において $q = 0$ の境界条件のもとに積分する。その結果、潮汐によって水路内に駆動される流れ（潮汐流）の単位幅流量 q は時間 t と位置 x によって変化するものとなり、次式で与えられる。

$$q = a\omega(L - x) \cos \omega t \quad (3)$$

式(3)より q は下流端で最大値 $q = a\omega L \cos \omega t$ であり、上流ほど距離に比例して弱体化して上流端では0となることが分かる。ここで、距離 x を L 、水深 h を h_0 、流量 q を $a\omega L$ 、流速 u を $a\omega L / h_0$ で無次元化するとそれぞれ次の無次元量が得られる。

$$h_r = 1 + \frac{a}{h_0} \sin \omega t \quad (4)$$

$$q_r = (1 - x_r) \cos \omega t \quad (5)$$

$$u_r = \frac{q_r}{h_r} = \frac{(1 - x_r) \cos \omega t}{1 + \frac{a}{h_0} \sin \omega t} \quad (6)$$

ここに、添字 r を付した記号は無次元諸量であることを表わしている。

図-2は次章の表-1に示す $a = 2(\text{cm})$ 、 $h_0 = 5(\text{cm})$ ($a/h_0 = 0.4$) の実験ケースについて、式(4)より算出される水位 h_r と、式(6)で算出される $x = 0$ における断面平均流速 u_r の値の経時変化を示したものである。なお、 x が正の方向に流れている時の u_r の値を正と定義する。

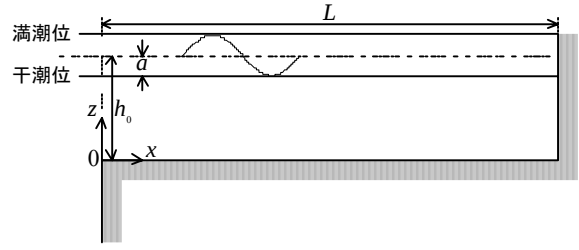


図-1 流動場の模式図

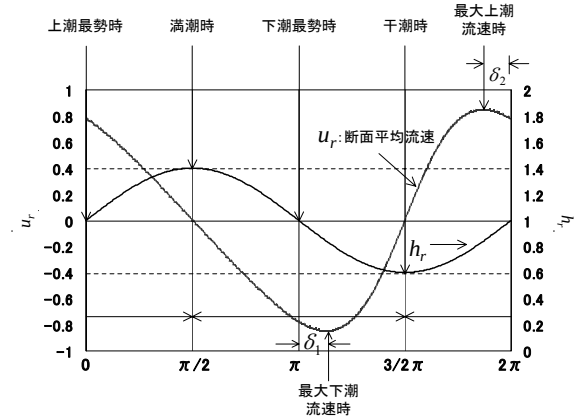


図-2 無次元水位と無次元流速の経時変化
($a=2\text{cm}$, $h_0=5\text{cm}$, $a/h_0=0.4$)

同図に示すように水位 h_r は $\omega t = 0, 2\pi$ では上潮最勢時（水位 $h = h_0$ ）、 $\omega t = \pi$ では下潮最勢時（水位 $h = h_0$ ）、 $\omega t = \pi/2$ では満潮時（水位 $h = h_0 + a$ ）、 $\omega t = 3/2\pi$ では干潮時（水位 $h = h_0 - a$ ）となる。

同図より最大下潮流速時は下潮最勢時に対して δ_1 だけ位相が遅れ、最大上潮流速時は上潮最勢時に対して δ_2 だけ位相が先行する。その結果、最大下潮流速時から最大上潮流速時への流速の変化は急激であるのに対して、最大上潮流速時から最大下潮流速時への変化は緩慢であることが分かる。このような潮位の変化に伴う流れの特徴は、現地で観察されるのとは一致するものである¹¹⁾。

3. 実験方法および相似則に関する検討

(1) 実験装置と実験方法

実験装置は図-3(a)に示すように、水路内に潮汐発生を模擬するために周期的に上下動させることが可能なフロートを設置した下流側水槽、実験での測定を実施するための長さ $L = 7.5(\text{m})$ 、水路幅 $B = 20(\text{cm})$ の開水路、潮汐流を顕在化（流量を大きくする、式(3)参照）させるために開水路の長さの不足を補うために設置する上流側水槽から構成されている。また、実験水路における座標は、水路下流端中央部から上流に向かって x 軸、水路幅方向に y 軸、水路底面より鉛直上向きに z 軸をとる。実験での流速測定には直径 $5(\text{mm})$ のプロペラ式流速計を使用した。

実験に用いたマンガルの樹林部を模擬するための模擬植生は幅 $5(\text{cm})$ 、長さ $100(\text{cm})$ の平板に非揺動性のステンレスの丸棒（直径 $1.0(\text{mm})$ 、高さ $120(\text{mm})$ ）を千鳥格子状に配置して作成した。このようにして作成された模擬植生

を $x = 3(m)$ の地点より水路内の側壁に沿って設置した (図-3参照) . また, 模擬植生の設置部と水路の非設置部の底面の高さが一致するように非設置部の高さを補正した. この模擬植生を実験装置の水路に設置した場合, 開水路幅20(cm)の内, 5(cm)はマンガルの樹林部 (植生領域) を, 15(cm)は水路部 (非植生領域) を模擬することになる. なお, 模擬植生設置による流況を論ずるための座標を, 模擬植生下流端部より模擬植生と水路部の境界を上流方向にX軸, 水路幅方向にY軸とした (図-3(b)参照) .

実験上の模擬植生の密度の設定に当たっては, 沖縄諸島に多く生育するヤエヤマヒルギ (*Rhizophora stylosa*) を念頭に置いた. Sato¹²⁾の現地調査によれば, ヤエヤマヒルギは, 気根を有するマングローブ種であり, その気根は幹を中心とし半径2(m)程度, 高さ1(m)程度の範囲に立体的で複雑な形態を取る. このような複雑な気根の形態を, 実験模型に正確に取り込むことは困難であることから, 本研究では気根が最も密な状態である最下層部 (地面より50(cm)程度まで) を研究対象とした. Satoは, 最下層の気根密度は9~35(本/ m^2)であり, 気根の平均直径は2.7(cm)程度であると報告している. ここで, 最も密な密度 (35(本/ m^2)) を想定すると, 気根間距離は直径の7倍程度になる. この事を踏まえ, 幾何学的に相似な模擬植生の配置を定めたものが表-1のcase2 (2.25(本/ cm^2)) である. これを植生密度が密と定義した上で, その生長途中の粗なケースとして中密 (case3, 0.70(本/ cm^2)) , 粗 (case4, 0.20(本/ cm^2)) を設定した.

(2) 相似則と対象とする流れ場

振動乱流境界層については過去に多くの研究が実施されており, 壁面付近の流れの主流に対する位相の先行や, 減速時の強い乱れの発生などの特性が明らかにされている^{13), 14)}. 本研究で取り扱う現地のマンガルの水路部の流れは学術的には潮汐流によって駆動される振動乱流境界層である. このマンガル内の流れを実験室で再現するためには相似則についての検討が必要であり, 以下に考察する.

振動乱流境界層の基礎式は流れ方向 (x 方向) のレイノルズ方程式であるが, これに境界層外の自由流の流れの条件を考慮した上で無次元化すると基礎方程式にレイノルズ数 Re ($=u_{\infty}h_0/\nu$, u_{∞} は代表流速, h_0 は平均水深, ν は水の動粘性係数) とストローハル数 St ($=h_0/u_{\infty}T$, T は流れの周期) が表れる (詳細は紙面の都合により割愛する). この内, Re 数は現地と実験で一致させることは不可能である. 一方, St 数は非定常性の強さを表す指標であり, 実験室でマンガルの流れの非定常性を模擬するための重要な指標となる.

本研究ではR型マンガルの樹林帯と水路部の干渉に着目するが, 実験の対象とする現象は水路部を水が流れ, かつ樹林部と分離されている時間帯である. この時間帯は, 対象とする水路部のマンガル内の位置によって異なるものの, 潮汐の1周期: 約12時間の内, 数時間程度であることが多い⁹⁾.

本報における実験では, 表-1に示すように潮汐の周

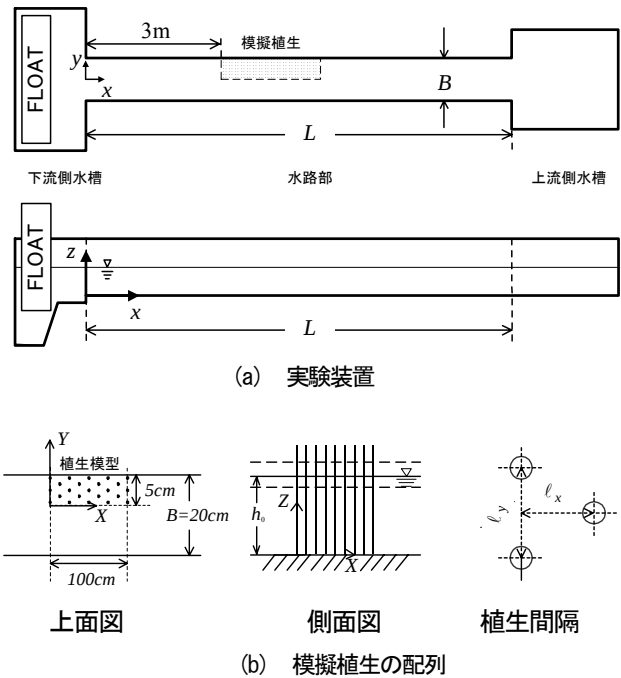


図-3 実験装置と模擬植生の配列および設置位置の座標

表-1 実験条件一覧

case	平均水深 h_0 (cm)	周期 T (s)	振幅 a (mm)	模擬植生 の有無	植生密度 (本/ cm^2)	植生間隔(mm)	
						ℓ_x	ℓ_y
1	5.00	180	± 200	無	-	-	-
2				有	2.25(密)	7	7
3					0.70(中密)	12	12
4					0.20(粗)	24	24

期 T を $T = 180(s)$ とした. 以下に同周期で実験を実施するときの現地における現象との相似性について St 数を使用して検討する.

相似性の検討のための実験条件の一例として表-1の植生無しのcase1の実験を取り上げる. 同実験の水路内の平均水深は $h_0 = 5(cm)$, 代表流速としては実験で観測された最大上潮流速をとり $u_{\infty} = 40.6(cm/s)$, 周期 $T = 180(s)$ とした. 一方, 比較のために念頭に置く現地の感潮域の条件を, 仮に平均水深 $h_0 = 5(m)$, 周期 $T = 12(hour)$ (潮汐の周期), 代表流速として最大上潮時流速をとり $u_{\infty} = 100(cm/s)$ とする. 両者からストローハル数 St を算出すると, 実験: $St = 6.84 \times 10^{-4}$, 現地: $St = 1.16 \times 10^{-4}$ となる.

本計算事例では実験の非定常性は現地に比較して6倍程度強いことが明らかである (St が大きいほど非定常性が強い). ただし, 本研究では上述のように, 現地におけるR型マンガルの研究対象とする潮時が一般的に数時間であることを考慮すると, 実験と現地のストローハル数は比較的一致していると考えることができ, 実験は現地の非定常性を再現しうると考える.

4. 実験結果と考察

表-1に実施した実験条件一覧を示す。同表中でcase1は模擬植生を設置しない場合であり、case2～case4は、模擬植生の密度がそれぞれ密、中密、粗と変化させた実験ケースである。

(1) 流速の経時変化

図-4に流速の経時変化の事例を示す。case1の測定位置は水路中央部（X=50cm, y=0cm, Z=2.5cm）であり、case2, case4の測定位置は模擬植生の中央部の地点（X=50cm, Y=2.5cm, Z=2.5cm）である。図中の水位は下流側水槽での値である。以下に図-2に示す理論計算結果と図-4の実験結果との比較を行い、実験が感潮域の流れの特性を再現しているかについて検討する。

植生無のcase1の結果と図-2を比較すると、実験結果は理論と同様に、最大下潮流速時は下潮最勢時に対して δ_1 だけ位相が遅れ、最大上潮流速時は上潮最勢時に対して δ_2 だけ位相が先行すること、最大下潮流速時から最大上潮流速時への流速の変化は急激であるのに対して、最大上潮流速時から最大下潮流速時への変化は緩慢であることなど、図-2で確認された潮汐流場の特徴が実験的に再現されていることがわかる。一方、植生有のcase2とcase4における流速の経時変化を植生無のcase1を比較すると、植生密度が大きいほど δ_1 が大きくなると共に δ_2 が小さくなること、また流速自体が小さくなると共に潮汐流の特徴である上潮時と下潮時の流速の非対称性が失われて対象に近づくことがわかる。つまり、植生の存在により、その密度が大きいほど潮汐流の流動の特性が失われてゆくが、これは植生の存在が流れに対して抵抗として働くためである。ところで、図-4より上潮最大流速と下潮最大流速の絶対値を比較すると、上潮最大流速の方が大きいことがわかる。これは川西等¹¹⁾による現地観測により報告されている現象と一致する。この現象は、 $x=0$ の地点での流出と流入の水頭損失の差に基づくものと考えられる。

以上のように、使用した実験装置は現地の感潮域の流動の特徴を再現しうるものであることがわかった。以下では、植生領域を設置した上で、本装置を使用した詳細な検討結果について述べる。

(2) 模擬植生を有する水路における流れの水平構造

植生を有する定常流中の流れの水平構造に関する研究事例は多い。それらの中で、池田等は植生領域を含む定常流れの水平流速分布について検討し、植生領域と非植生領域とに分離した理論式を提案している⁴⁾。なお、彼等の研究の植生領域は上述の樹林部に、非植生領域は本研究の水路部に対応している。

本研究は定常流れに比べて複雑な現象である非定常流を取り扱っている。しかし、潮汐流の潮時を定めた上での両者の比較は潮汐流の持つ環境機能を知る上で有意義であると考えられる。ここでは、非定常流れに関する本実験の潮時の中で、流速変化の小さい最大上潮流速時（ $\omega t \sim 0$ ）における上流方向への水平流速分布を、池田等が定常流のケースについて提案している理論解析結果と比

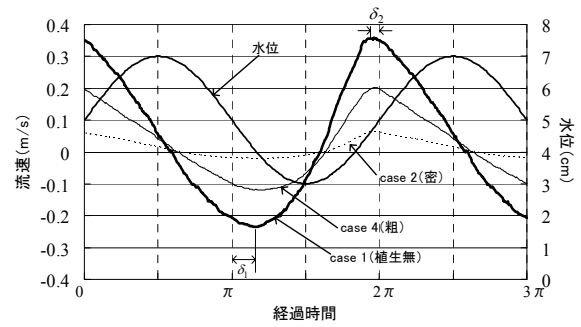


図-4 模擬植生内における流速の経時変化

較して両者の差異について検討することとする。

池田らは植生領域と非植生領域とに分離し、定常流の水平流速分布式として次式を提案している。

非植生領域（マンガルの水路部）：

$$\phi = \frac{u}{u_\infty} = 1 - (1-j) \exp\left(\sqrt{\frac{2}{\nu}} \eta\right) \quad (10)$$

植生領域（マンガルの樹林部）：

$$\phi = \frac{u}{u_\infty} = j \left[j + (1-j) \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{\nu}} \frac{\eta}{j}\right) \right] \quad (11)$$

ここに、 $\eta = y/b$ 、 $j = 1/(1+\chi)^{1/4}$ 、 $\chi = C_D \lambda h / 2C_f$ 、 $\lambda = d/(2\ell_x \ell_y)$ は池田等の定義する植生密度、 $\nu = \alpha / \sqrt{C_f (h/b)^2}$ である。また、 u は流下方向の流速、 u_∞ は代表流速、 h は水深、 d は植生の直径、 ℓ_x, ℓ_y は植生間距離（図-3 (b) 参照）、 C_D は植生抵抗係数、 C_f は底面摩擦係数、 b は水路幅、 y は幅方向の座標、 α は補正係数である。なお、以下では $\alpha = 0.16$ 、 $C_D = 1.8$ 、 $C_f = 0.00653$ として計算した。

上述の、 α 、 C_D 、 C_f の値は、定常流のケースと比較対象とする本実験の最大上潮流速時の水深が約5(cm)、流速が約40(cm/s)であることを念頭に置き、池田等の実験の中で類似の値を持つRun3⁴⁾の値を準用したものである。従って、計算される定常流の水平流速分布は、著者等の非定常の実験の最大上潮流速時の水深と流速で定常流れを生じさせたとした場合に対応する。ただし、池田等の実験条件と本実験の最大上潮時の条件には若干の差異があるため、理論が与える流速分布は誤差を持っているものの比較の対象として定性的な議論を行う上では問題ないと考えられる。

図-5, 6に水平流速分布に関する実験結果（●）と池田らの理論解（実線）との比較を示す（座標については図-3参照）。植生密度が密な場合（case2, 図-5）の植生領域（Y=0～5cm）の流速分布は理論より極めて小さいことが分かる。これは、非定常流では植生帯内の流れが非植生領域（y=-15～0cm）の流れに応答するための時間が長くなるためである。これとは逆に非植生領域の流速は植生領域の流速減少を補うように大きくなっている。その結果、池田等が大規模平面渦の発生原因

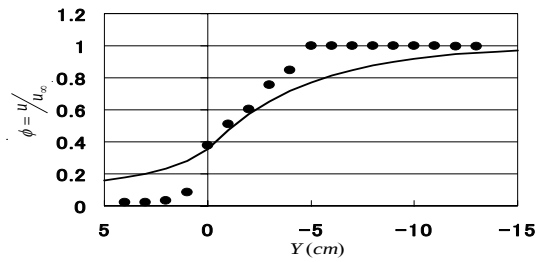


図-5 水平流速分布(case2: 密)

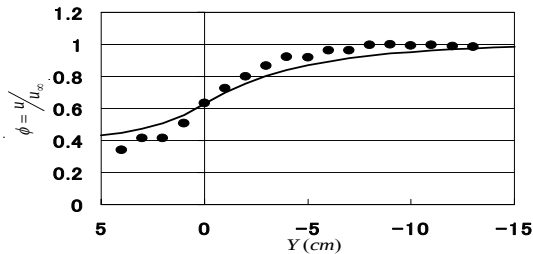


図-6 水平流速分布(case4: 粗)

となると指摘している流速分布の変曲点近傍の曲率が大きくなっていることがわかる．つまり，定常流に比較して非定常流れでは大規模平面渦が発生しやすくなると考えられる．

一方，植生密度が粗な場合（case4，図-6）の比較では，図-5と同様な傾向が認められるものの植生領域と非植生領域の流速差は小さくなるとともに，水平流速分布の植生境界付近に表れる変曲点近傍の曲率も小さくなっていることが分かる（ただし定常流の場合より大きい）．これは，植生密度が粗になると，流れが植生から受ける抵抗が大きく減少するので，植生領域内の流れが非植生領域の流れに対して応答する時間が短くなるためであると考えられる．

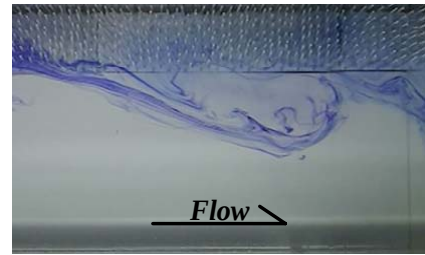
以上のように，マンガルの植生領域は定常流の場合と比較して，大規模平面渦が発生しやすくなること，また，植生領域内における流れ（透過流速）をより弱化させる効果を持っている．この透過流速の弱化は植生領域に強い物質堆積効果をもたらすと考えられる．

(3) 模擬植生近傍の平面渦の観察と流況の可視化

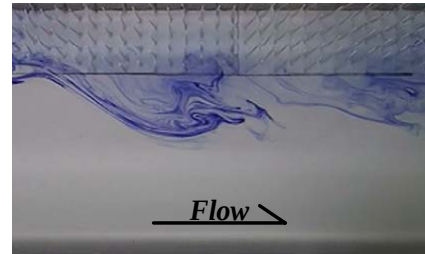
模擬植生無のcase1の流況観察によれば，水路部の側壁近傍の流れは，潮時の変化に対して水路中心部の流れに先行して位相が変化するなどの振動乱流に特徴的な現象が観察された．また，case2～case4の模擬植生有の流況観察結果より，側壁近傍では植生密度が大きいほど振動乱流境界層としての特徴が弱化することが明らかになった（紙面の都合により詳細は割愛する）．

一方，前述のように植生領域と非植生領域の境界付近（ $Y=0$ ，図-3（b）参照）には定常流の場合より大規模平面渦が発生しやすくなると推察される．この平面渦は流れの中に強い乱れを生じさせるとともに，マンガルの物質輸送に大きく寄与すると考えられる．このため，その特性を明らかにすることは環境水理学上の観点から重要な課題であり，以下に流れの可視化により考察する．

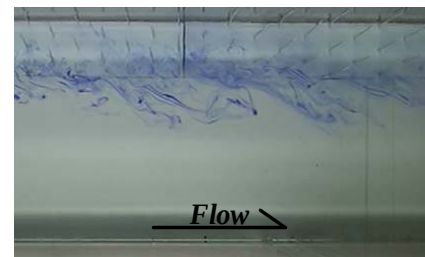
写真-1は，case2の植生密度が密なケースの最大上潮



(a) case2



(b) case3



(c) case4

写真-1 平面渦の発生状況(パターンB, $h_0=8\text{cm}$)

流速時近傍の潮時の大規模平面渦の発生状況を可視化したものである．写真-1（a）より，植生境界面付近から非植生領域に及ぶ大型の二次元的な平面渦が形成されている様子が分かる．しかし，植生密度がcase3（中密），case4（粗）と小さくなると，平面渦は小型化することがわかる（写真-1（b），（c）参照）．これは，植生密度が小さくなると流速分布の変曲点の曲率が小さくなるためである．

ここで，植生密度が密な写真-1（a）に示す大規模渦の経時変化について考察することとし，その形成・成長・分離・消滅の過程を模式的に図-7に示す．同図に示すように，上潮時（下潮時の場合も同様）の非植生領域の流速が大きくなり始めると平面渦が形成され始める（図-7（a）参照）．潮時が進行して非植生領域の流速が大きくなると，植生と水路の境界面付近の流速分布の変曲点の曲率が大きくなり，平面渦が成長して大規模化する（図-7（b）参照）．さらに，潮時が進行して下潮近くになると，振動乱流境界層の特徴により，植生領域では非植生領域に対して位相が先行して先に流速が反転する．このとき，大規模平面渦は植生領域より分離され，非植生領域全体に広がる（図-7（c）参照）．その後，潮時の進行で水路全体が下潮になると分離した大規模平面渦は消滅する（図-7（d）参照）．以上の過程を上潮時と下潮時で繰り返す事となる．ただし，上潮最大流速は下潮最大流速より大きいいため，上潮時の平面渦がより大規模化する．

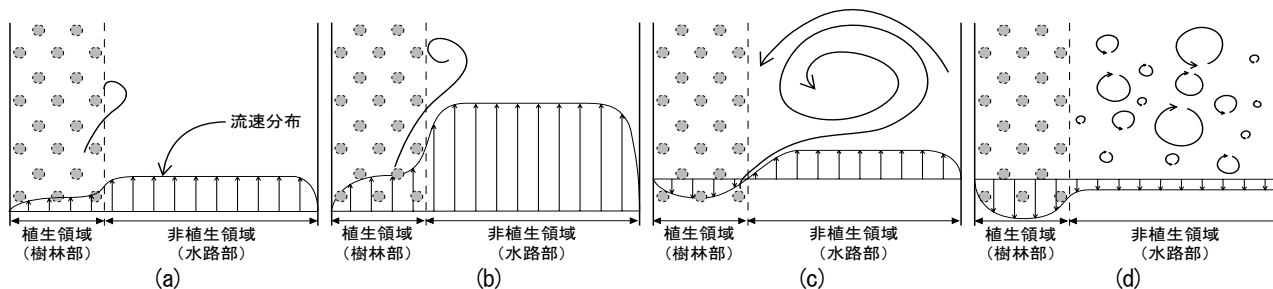


図-7 平面渦の形成・成長・分離・消滅の模式図

なお、植生密度が十分に大きくなると、植生境界面は擬似的な壁面と見なせることとなり、平面渦は発生しなくなると考えられる。つまり、植生境界面に発生する平面渦が最も大型化する植生密度が存在することが考えられるが、これは今後の検討課題である。

ところで、本論文では非定常流の水平流速分布の持つ曲率が定常流より大きいことを示した。そして、このことが定常流に比較して水平渦が大規模化する原因であるという観点で議論を進めている。しかし、非定常乱流場では主流と乱れ間のエネルギーの移動によって加速時の乱れの低減や減速時の乱れの発生などが生じ、定常流とは異なる特徴を持っていることが知られている。この非定常乱流場のエネルギーの移動や乱流構造の特徴が水平渦の強さや規模に大きな影響を与えている可能性があるが、これについても今後の検討課題である。

5. まとめ

本研究はR型マンガルを念頭において、潮汐によって生ずる非定常流の特性、流れと植生帯との干渉に関して実験的検討を実施したものである。検討によって得られた知見を以下に整理して示す。

- 1) 使用した実験装置は潮汐流の特徴を再現しうることが分かった。また、植生密度が大きくなると、最大下潮流速時の下潮最勢時に対する位相遅れ δ_1 は大きくなり、逆に最大上潮流速時における位相先行 δ_2 は小さくなることわかった。また、植生密度が大きくなると振動乱流としての特性が弱化する事がわかった。
- 2) 水路内の上潮最大流速時近傍の潮時の水平流速分布について定常流の場合の池田等の理論解析結果と比較した。その結果、定常流と比較して植生領域内の流れは遅くなると共に非植生領域では速くなることが分かった。その結果、水平流速分布の変曲点における曲率が大きくなり、定常流より大規模な平面渦の発生が生じうることを明らかにした。また、植生領域は振動乱流としての潮汐流の特性を弱化させ、定常流の場合よりも植生帯内の流れを静穏なものとするように機能することがわかった。
- 3) 植生領域と非植生領域の境界面において発生する大規模渦を可視化し、その経時的挙動を明らかにした。また、実験の範囲では植生密度が密なほど二次元的な平面渦が大規模化することが明らかになった。ただし、平面渦が最も大規模化する植生密度が存在すると考えられるが、これは今後に残された検討課題である。

参考文献

- 1) Marshall, J. K.: Drag Measurements in Roughness Arrays of Varying Density and Distribution, *Agr. Meteorol.*, 8, pp.269-292, 1971.
- 2) Järvelä, J.: Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants, *J. Hydrology*, 269, pp.44-54, 2002.
- 3) Nepf, H. M.: Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation, *Water Resources Res.*, 35, pp.479-489, 1999.
- 4) 池田駿介・泉典洋：浮遊砂の横断方向拡散係数について、*土木学会論文集*, No.434, II-16, pp.47-55, 1991.
- 5) 池田駿介・太田賢一・長谷川洋：側岸部植生境界の周期渦の発生機構、*土木学会論文集*, No.443, II-18, pp.47-54, 1992.
- 6) 太田隆夫・小林信久：波・流れ場における人工海藻の水理特性、*海岸工学論文集*, 第51巻, pp.666-670, 2004.
- 7) 林建二郎・今野政則・服部健一：藻場や水辺植生・樹林帯の消波特性評価、*海岸工学論文集*, 第52巻, pp.686-690, 2005.
- 8) Suzuki, T. and Dijkstra, J.: Wave propagation over strongly varying topography: cliffs and vegetation, *XXXII IAHR Congress*, CD-ROM, 2007.
- 9) 松田義弘：マングローブ沿岸水域の物理環境、*海の研究*, Vol.6, No.2, pp.87-109, 1997.
- 10) Tanaka, N.: Vegetation bioshields for tsunami mitigation: review of effectiveness, limitations, construction, and sustainable management, *Landsc. Ecol. Eng.*, 5, pp.71-79, 2009.
- 11) 川西澄・安井崇績・余越正一郎：浅水感潮域における非定常密度流、*水工学論文集*, 第40巻, pp.499-504, 1996.
- 12) Sato, K.: Studies on the protective functions of the Mangrove forest against erosion and destruction, *Sci. Bull. Coll. Agr. Univ. Ryukyus*, 25, pp.615-630, 1978.
- 13) Jonsson, I. G. and Carlsen, N. A.: Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer, *J. Hydraulic Research*, 14, pp. 45-59, 1976.
- 14) Hino, M. and Sawamoto, M.: Experiment on transition to turbulence in an oscillatory flow, *Technical Report*, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, 19, pp. 15-49, 1975.

(2009. 9. 30受付)