

## 植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の拡大過程

Deposition of Suspended Sediment around Vegetated Area and Expansion Process Vegetation

辻本哲郎\*・北村忠紀\*\*

By Tetsuro TSUJIMOTO and Tadanori KITAMURA

During floods, suspended wash load hardly deposit on a rough bed in fluvial-fan rivers but it often deposit near vegetated areas. When there is an isolated vegetated area, wash load deposit behind the vegetation. During the period with small discharge after flood, the sand-deposited area is exposed to the invasion of vegetation and the vegetated zone becomes longer. Then, the next flood deposit sand further behind the vegetated area to prolong it. When the vegetated zone becomes long enough, the flow accelerate behind it and no longer the deposition occurs. Such an interaction among flood flow, river morphology and vegetation is the most important key to form the habitat in rivers.

**Keywords:** *suspended sediment, wash load, deposition, vegetation, river environment management*

### 1. まえがき

今日、治水・利水・環境の3つの機能を等しく向上させていく河川整備を指向するうえで、洪水の頻度（流況）、流送土砂、河道動態そして植生の相互作用についての十分な理解が必要となってきた。本研究ではとくに洪水時の植生周辺での土砂堆積、そしてそれに続く低水時のその部分の陸化とそこへの植物侵入をモデル化して、こうしたプロセスの定量化・予測への基礎的知見としようとするものである。



写真1 植生周辺の土砂堆積

\* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科  
(〒920 金沢市小立野2-4 0-20)

\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部環境地球工学教室  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

写真1は手取川1995年出水後の植生周辺の土砂堆積状況を示すものである。手取川は典型的な扇状地河川でこの周辺での河床勾配は約1/150、河床材料は数10cm程度である。出水時の流れはウォシュロードを含む浮遊砂を多く含む濁流で、細砂は主流路には堆積しないが植生域（カワヤナギ群落）周辺に堆積する。出水後、堆積域は陸化し、数日の間に植生が侵入、季節によっては数ヶ月でカワヤナギ等の群落に成長する。このような植生の破壊を伴わない程度の洪水と低水位状態の繰り返しは、近年多くの河川で経験される状況であり、こうした状況での河道内植生域の拡大もよく見られるところで、河川の治水・利水・環境機能面に大きな影響を与えている<sup>1)</sup>。

このような状況を想定し、本研究では礫床水路を対象とし、洪水時に浮遊砂が流下してきて初期条件として想定された植生域周辺に堆積する状況を考える。洪水後、低水位を想定、陸化する領域を特定して植生域に置き換え、次の洪水を経験する。こうしたプロセスの繰り返しによって、低水時の陸域・植生域がどのように変化していくかそのパターンを、実験室での基礎実験と数値解析によって検討する。

## 2. 植生域周辺での浮遊砂の堆積と植生域拡大に関する基礎実験

実験は長さ12m、幅0.5mの矩形断面直線水路において行った。水路床には粗面として直径0.22cmの一樣砂を張り付けて固定床とし、さらに模擬植生としてかなり疎な構造を持つ水槽用のフィルター材をほぐした超多孔体（透水係数 $K_f=40\text{cm/s}$ ）を幅、長さ、高さともに5cmの立方体にカットして、水路下流端から5.5mだけ上流の位置の水路中央部に設置した。

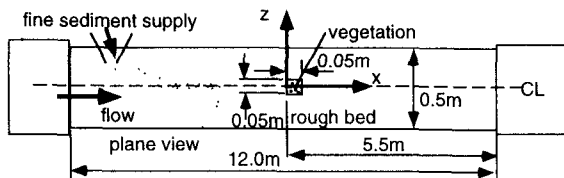


図1 水路図

図1に水路の概略を示す。ここに洪水流を想定して水流を導き、模擬植生設置箇所の上流端から1.0～3.0m下流の区間ではほぼ等流となるように下流端の堰を調節した。実験条件は、路床勾配  $i_b=1/1000$ 、流量  $Q=5200\text{cm}^3/\text{s}$ とした。このとき等流部の水深  $h_0=4.2\text{cm}$  であり、これより抵抗係数  $C_f \equiv (u_{*0}/U_m)^2$ ,  $u_{*0} \equiv (gh_0^3)^{1/2}$ ,  $U_m$ : 断面平均流速,  $g$ : 重力加速度) を逆算すると0.0065である。微細砂として直径  $d_s=0.0075\text{cm}$ 、比重1.3、沈降速度  $v_s=0.09\text{cm/s}$ の塩化ビニールの微細粒子を用い、これを水路の上流端から  $Q=1.34\text{cm}^3/\text{s}$ だけ水路中に供給した。すなわち、流入部での微細砂の断面平均濃度は  $C_0=2.6 \times 10^{-4}$ である。なお本実験条件では微細砂は模擬植生周辺の流速の低下した領域以外の河床にはほとんど堆積しない。

図2は通水後40分経過後通水を停止したときの模擬植生周辺の微細砂の堆積形状を示したものである。図より、模擬植生背後に堆積域が生じているが、模擬植生を設置した領域内部には堆積はほとんどなく、むしろそれより下流側の領域に堆積が集中しており、最大で約0.35cmの厚さの堆積が生じている。

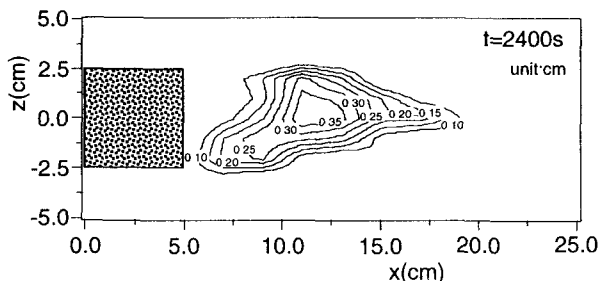


図2 模擬植生周辺の微細砂の堆積形状

こうした堆積域には低水時に植生が侵

入するものと想定し、堆積域に模擬植生を設置した後、洪水時を想定して通水し、同様に水路上流端から微細砂を供給した。ただし、実際の堆積域の形状は三角形状であるのに対し、簡単のために設置する模擬植生の幅ははじめに設置された模擬植生の幅と同一とした。すなわち、堆積形状からは設置する模擬植生の流下方向長さを決め、模擬植生の幅は流下方向に変わらないものとした。20分間通水して水流を注意深く止め、堆積形状を写真撮影した後、同様にして堆積位置に模擬植生を設置することを繰り返した。なお、これらの一連の作業において、新たに模擬植生を設置しても下流端の堰高はじめのままとしたが、模擬植生の設置上流端から1.0～3.0m下流の区間ではほぼ等流状態が保たれていることを確認している。

写真2は通水毎の堆積域の形状および模擬植生域の拡大の様子を示したものである。これより模擬植生域の長さが拡大するにしたがって、模擬植生域背後の堆積域の長さが短くなる様子が見えてくる。通水毎の模擬植生域の長さの変化は図3に示すとおりである。

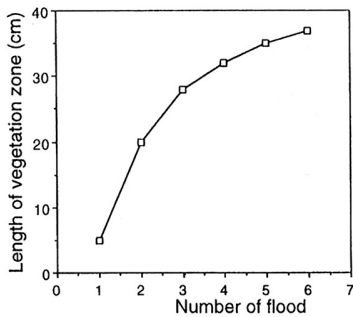


図3 模擬植生域長さの変化

図4は第1, 6回目の洪水時（それぞれ模擬植生域長さ5cmおよび37cm）を想定した通水における水路中心軸上の40%水深の位置での主流速の流下方向変化を示したものである。ここで流速は直径3mmのプロベラ流速計によって計測している。主流速は模擬植生に近づくにつれて減速するが、模擬植生が透過性を有するために模擬植生内部領域でも減速し続けている。第1回目の通水時には、模擬植生の長さが短いために模擬植生内部領域では流速が減速しきらず、模擬植生背後の領域にまで流速の減速が続いている。これにより主流速が最小となる位置が模擬植生の背後の領域に現れ、このために最大堆積を示す位置も模擬植生内部の領域ではなく、その背後になるものと考えられる。第6回目の通水時には模擬植生域の長さが模擬植生域内で流速を減速させるのに充分長いので、模擬植生背後の領域ではむしろ流速は減速されず、むしろ加速され、このために模擬植生域背後に堆積が生じにくくなっている。

これらの実験から、実河川においても河道内の小規模植生域が堆積を伴いながら流下方向に拡大したとしても、植生域の長さが植生域内での流速を減速するのに十分な長さを持つようになると、その拡大速度はかなり小さくなることが予測される。植生や水理条件、微細砂の供給条件などで植生域の拡大速度等は変化すると考えられるが、上述の傾向はいずれの条件の場合にも当てはまるものと思われる。

### 3. 植生域周辺の流れと浮遊砂の堆積に関する数値計算

橋脚等の透過性のない物体周りの流れは物体前面での剥離渦が生じるなど3次元性が卓越し、単純な2次元的な取り扱いには無理があるといわれている。一方、植生域のような透過性を有する物体では、植生域内を

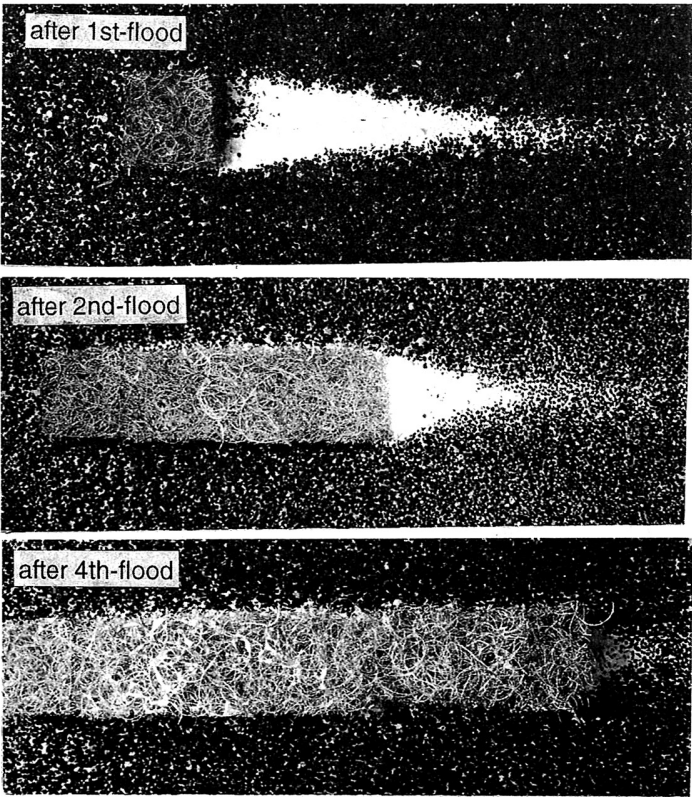


写真2 模擬植生周辺の微細砂の堆積の様子

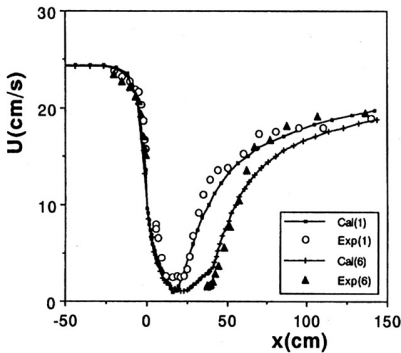


図4 流速の流下方向変化

ある程度流れが通過することができるため、例えば植生域前面での剥離渦等の3次元性の強い流体運動は顕著でないものと推定され、ここでは流れ場の計算に水深平均された平面2次元モデルを用いるものとする。清水・辻本<sup>2)</sup>は流路内に植生域を伴う流れ場の平均流構造を、植生による形状抵抗を考慮し、かつ水深平均された乱流モデル（1方程式モデル）を用いて良好に再現している。ここでも、これらを踏襲し水深平均された乱流モデルによる解析を行う。ただし、乱流モデルにはRastogi & Rodi<sup>3)</sup>による底面粗度効果を考慮した水深平均 $k$ - $\epsilon$ モデルを用い、 $k$ 、 $\epsilon$ 方程式それぞれに底面粗度効果とは別にさらに植生による形状抵抗の効果を付加している。流れの基礎式は以下の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial z}(hW) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hU^2 - hv_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWU - hv_T \frac{\partial U}{\partial z}\right) = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hv_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) - F_x - \tau_{bx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hWU - hv_T \frac{\partial W}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW^2 - hv_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hv_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) - F_z - \tau_{bz} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hUk - h \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWk - h \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}\right) = P_k + P_{kv} + P_{kb} - h\epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hU\epsilon - h \frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW\epsilon - h \frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right) = C_1 \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{ve} P_{kv} + C_{be} P_{kb}) - C_2 h \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6) \quad : \quad P_k = hv_T \left\{ 2 \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda h U \sqrt{U^2 + W^2} \quad (8) \quad : \quad F_z = \frac{1}{2} C_D \lambda h W \sqrt{U^2 + W^2} \quad (9)$$

$$\tau_{bx} = C_f U \sqrt{U^2 + W^2} \quad (10) \quad : \quad \tau_{bz} = C_f W \sqrt{U^2 + W^2} \quad (11)$$

$$P_{kv} = F_x U + F_z W \quad (12) \quad : \quad P_{kb} = \tau_{bx} U + \tau_{bz} W \quad (13)$$

ここで、 $(x, z)$ : 流下方向、横断方向座標、 $(U, W)$ : 流下・横断方向の水深平均流速、 $h$ : 水深、 $y_b$ : 基準面からの路床高、 $v_T$ : 渦動粘性係数、 $k$ : 乱れエネルギー、 $\epsilon$ : 乱れエネルギーの逸散率、 $C_f$ : 路床の摩擦抵抗係数、 $C_D$ : 植生要素の抗力係数、 $\lambda$ : 流体の単位体積あたりの植生要素による遮蔽面積である。乱流モデルのモデル定数 $C_\mu$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\epsilon$ については標準値を用い、さらに植生の形状抵抗に関わる係数 $C_{ve}$ については鉛直2次元の植生層を伴う流れ場の実測から決められた1.3を用い<sup>4), 5)</sup>、底面摩擦抵抗に関わる係数 $C_{be}$ についてはRastogi & Rodi<sup>3)</sup>により次式から算定する。

$$C_{be} = 3.6 \frac{C_2}{C_1} \frac{k}{\epsilon} C_\mu^{1/2} C_f^{1/4} \frac{\sqrt{U^2 + W^2}}{h} \quad (14)$$

基礎式はコントロールボリュームで積分した後、スタッガード格子を用いて離散化し、SIMPLE法により水深場と流速を求める。境界条件は壁面で数則の成立と局所平衡を仮定し、上流端で流量を、下流端で水位を与える。計算領域は、植生域の最上流部より上流へ1.0mの位置から下流へ2.5mの区間とした。

図5は、前章の実験条件の流れ場を上述のモデルにより計算した結果のうち、平均流速 $U$ の平面分布をコンター表示したものである。第1回目の通水

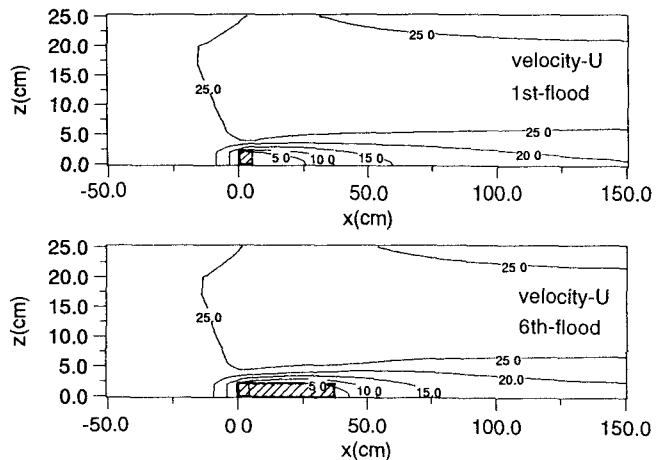


図5 主流速の計算結果

時において、最小流速が模擬植生域を過ぎた背後の位置に出現すること、また、その後の通水において、模擬植生域の長さが長くなれば、模擬植生域内で減速が終了し模擬植生域背後ではむしろ加速されることなど、実測結果の特徴を再現している。なお、水路中心軸上の主流速の流下方向変化の計算値を図4に併示したが、実測値との対応は概ね良好である。

これらの流れ場の計算結果を利用して微細砂の挙動を次の拡散方程式を用いて解析する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hUC - h \frac{v_T}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( hWC - h \frac{v_T}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial z} \right) = -S_c \quad (15)$$

ここで、 $C$ ：微細砂の濃度、 $v_p$ ：微細砂の沈降速度、 $\sigma_c$ ：渦動粘性係数と微細砂濃度の拡散係数の比、 $S_c$ ：底面への微細砂の堆積速度であり、底面が固定床であることを考慮して次式のように与える。

$$S_c = \begin{cases} \gamma_0 C - E & (\gamma_0 C > E) \\ 0 & (\gamma_0 C < E) \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 $\gamma$ ：微細砂の水深方向濃度分布に関わる定数であり、指数型分布を仮定すれば次式のような。

$$\gamma = \frac{15.0 v_0 / u_*}{1 - \exp(-15.0 v_0 / u_*)} \quad (17)$$

さらに、 $E$ ：底面からの微細砂の巻き上げ速度であり、次のように与える<sup>6)</sup>。

$$E = A_s \left( \frac{u_*}{v_p} \right)^m \left\{ 1 - \left( \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right)^2 \right\}^n v_p \quad (18)$$

ここで、 $u_*$ ：摩擦速度、 $\tau_* \equiv u_*^2 / \{(\sigma/\rho - 1)gd_s\}$ 、 $\tau_{*c}$ ：無次元限界掃流力であり、定数については $A_s=0.002$ 、 $m=2$ 、 $n=1.5$ とする。なお、摩擦速度は底面摩擦抵抗係数を一定として次式から求める。

$$u_* = \sqrt{C_f (U^2 + W^2)} \quad (19)$$

計算領域は流れ場と同様とし、境界条件として上流端で流入濃度 $C_0$ を与える。

前節の実験条件の流れ場に対して、 $\sigma_c=1$ 、 $\tau_{*c}=0.14$ としたときの計算結果から微細砂の堆積速度 ( $S_c/(1-\rho_0)$ ； $\rho_0$ ：微細砂の空隙率)の平面分布を図6に示す。図より、堆積速度分布は実験での堆積域形状を良好に再現している。また、実験では堆積速度がほぼ $6 \times 10^{-5}$ 以上の領域を堆積域とみなしたものともいえる。これは浮遊砂の堆積実験において、通水時間を適当に決めたため堆積速度が小さい領域の堆積を堆積域と認識できなかったためである。

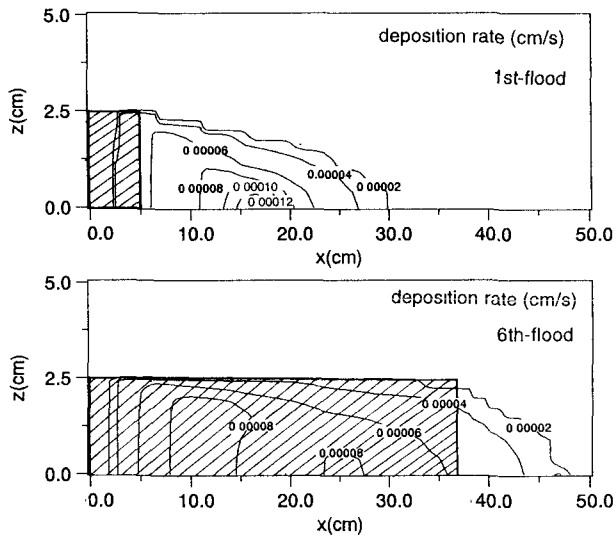


図6 堆積速度の計算結果

#### 4. 植生域拡大過程のシミュレーション

基礎実験においては、洪水時を想定した通水時間を適当に与え、その時の堆積域と認識される領域すべてが新たに植生域となるものとした。しかしながら、実際には低水時に水没する領域には植生は侵入しにくいし、さらに洪水の時間スケールによって堆積量が決定、これと低水流量によって低水時に水没せず植生が侵入できる領域が決まるものと考えられる。そこで、こうした低水時の非水没領域の違いによる植生域拡大過程の相違を前節の数値計算モデルを用いて調べてみる。ここでは、計算条件として洪水時間、低水水位を与

える。初期の小規模植生域を仮定して洪水時の流れ場と浮遊砂の堆積の計算を行い、低水時の非水没領域を新たに植生域とし、これを繰り返す。

計算例として、第2章の基礎実験と同様の水理条件で洪水時間を40分とし、低水水位を変化させた場合の植生域の拡大過程のシミュレーション結果を図7に示す。これより洪水の規模・継続時間が同一特性を示したとしても、低水水位の違いにより植生域の拡大速度が異なることが示されている。

## 5. あとがき

本研究では、洪水の頻度（流況）、流送上砂、河道動態そして植生の相互作用を総合的に取扱う手法を開発していくための基礎として、洪水時の植生域周辺での上砂

堆積とそれに続く低水時の堆積領域への植物侵入というプロセスを取り上げ、水路実験、数値解析による検討を試みた。植生域の規模や洪水特性によって微細砂の堆積特性が変化するほか、低水時の流況が植生域の拡大過程に影響することが示された。なお、本研究では想定した低水時の期間を堆積域に植生が侵入するのに十分長いものとして取り扱ったが、実際には、有意な微細砂が供給されるような洪水の生起間隔は灌木類が十分に生育する時間スケールよりも短い場合が多い。このときには、堆積域であっても十分に植生が繁茂できず、植生域の拡大速度はより小さいものとなる。こうした効果についても今後検討を行っていきたい。

本研究の遂行にあたり、数値解析に関して群馬大学工学部・清水義彦助教授に助言を頂いた。また北陸建設弘済会「北陸地域の活性化に関する研究助成」（辻本）を受けた。ここに記して感謝します。

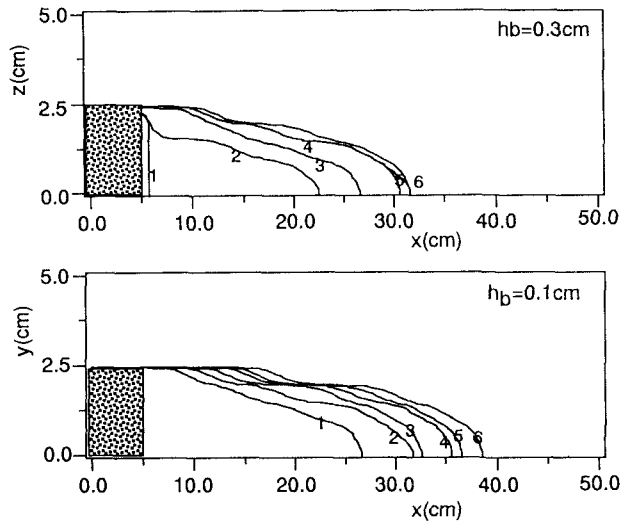


図7 植生域の拡大過程のシミュレーション結果

## 参 考 文 献

- 1) Shimatai, Y. and Y. Kayaba: Study on long-term change of ground cover and factors in alluvial fan using aerial photograph, *Proc. Int. Conf. Ecological System Enhancement Tech. for Aquatic Environ.*, Tokyo, pp.366-371, 1995.
- 2) 清水・辻本: 植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析, *水工学論文集*, 第39巻, pp.513-518, 1995.
- 3) Rastogi, A.K. and W. Rodi: Predictions of heat and mass transfer in open channels, *Jour. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol.105, HY3, 1979.
- 4) 清水・辻本・中川: 直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究, *土木学会論文集*, No.447/II-19, pp.35-44, 1992.
- 5) 中川・辻本・北村・藤井: 流れによって変形する植生粗度の抵抗則, *水工学論文集*, 第39巻, pp.465-470, 1995.
- 6) 池田編著: 流体の非線形現象, 朝倉書店, p.161, 1992.