

河床低下に及ぼす植生繁茂の影響

Effect of Growth of Vegetated Zone on Rotational Degradation Due to Floods

辻本哲郎*・北村忠紀**

By Tetsuro TSUJIMOTO and Tadanori KITAMURA

Without sediment supply from the upstream, the river is suffered by the so-called rotational degradation during flood. When the river is bordered by vegetation zone, the flow near the vegetated zone is retarded and the bed degradation is limited to the central zone. Then, during the period with small discharge after flood, some part of the width becomes dry, and it often allows the vegetated zone to invade there. On the next flood, the flow concentrates to the center zone more by the growth of vegetated zone and the degradation becomes severer. Such a process is discussed in a simple scheme experimentally and theoretically.

Keywords: river embirionment management, rotational degradation, bedload transport, vegetated channel, movable bed experiment

1. まえがき

今日、治水・利水・環境の3つの機能を等しく認識して河川環境管理を行っていくうえで、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。とくに、上流からの土砂供給が減少し、低水状態と中小洪水の繰り返しに特徴づけられるように規則正しくなった流況下でとくにrotational degradation型の河床低下（Gessler¹⁾は河床低下をparallel degradationとrotational degradationとに分類している）の進行が目立つが、そのなかでも低水状態での植生帯の拡大（大洪水による植生帯破壊の頻度が減っている）とみお筋の集中により、河床低下がより深刻化した河相が見られる。写真1は落差工が直列する区間で、河床低下が進行、植生帯がみお筋の集中とそこでの河床低下を助長している例である。下流の落差工から上流を見たものであるが、植生帯幅が上流に向かって広がっているのがみられる。

本研究は上述のような河床低下（rotational degradation）に及ぼす植生帯拡大の効果に着目して、次のようなシンプルなシナリオで数値解析と基礎実験により、このような現象の理解と将来の河川環境管理に向けての基礎的知見を得ようとするものである。側岸に沿って植生帯があると主流部にも植生帯寄りに遅い流れの領域を生じ（中央部に流れが集中）、ここを除いた中心領域で河床低下が進行する。河床低下帯が限定

* 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)

されるので、洪水後の低水時に陸地化する領域が現われ、ツルヨシなどがそこに侵入してきて植生帯が拡大する²⁾。上流は河床低下量も大きく低水流量はその部分だけに集中して流れるため陸化して植生の侵入を許す領域が大きい³⁾が、下流になれば河床低下量が小さく低水時の流量も河床低下帯から溢れ全体の幅にわたって流れるため植生の侵入はおこりにくい。このようにして上流から植生の侵入が進む。こういう状態で次の洪水を経験すると流れはさらに中央部に集中して河床低下帯は限定されてくる³⁾。このようにしてみお筋が限定され流量が集中してくるため、河床低下 (rotational degradation) の進行はより深刻化し、構造物安全度、利水機能そして生物生息環境 (ハビタート) に大きな影響を与える³⁾。

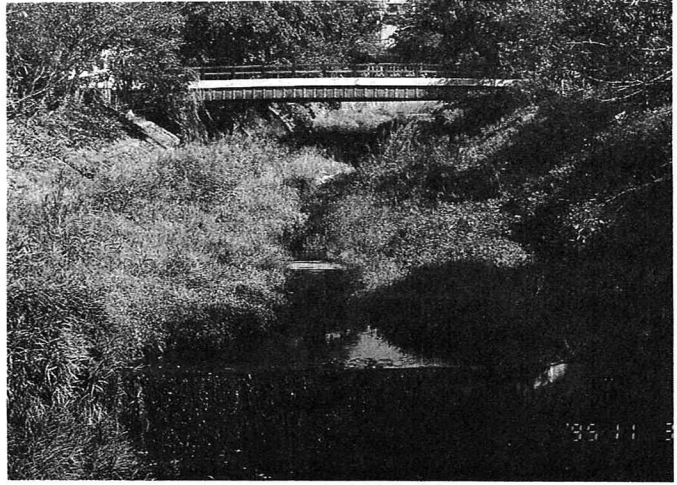


写真1 落差工間の植生繁茂 (木津川水系玉川)

2. 基本事象についての解析モデル

上記に説明した現象を簡単化して解析してみよう。図1に示すように、上流端からの給砂がなく、下流端が固定でrotational degradation¹⁾が生じる状況を考える。初期条件として水路両岸植生帯の幅を b_0 とする。洪水時の流量 Q 、初期流路勾配 i_{b0} 、河床材料の粒径 d が知られているとする。このとき横断方向流速分布が計算され、限界掃流力以上となっている領域が推定できる。この幅を $B(x)$ とする。植生帯を伴う洪水流の計算には $k-\epsilon$ モデルを乱流モデルに用いた水平2次元流解析 (付録で説明) を適用する。移動限界はSchields数0.05に相当するものとする、単位幅流量 $q=Uh$ が次式で与える限界値 q_c をとる位置である。

$$q_c = \frac{0.024g^{0.5}d^{1.5}}{C_f^{0.5}i_b} \quad (1)$$

ここに、 C_f : 路床の抵抗係数で、Keuleganの式によって与えた。これによって河床低下帯が限定される (植生帯を含まないような河床低下帯となる中洪水の条件で考えている。大洪水では植生帯まであるいはそれを含めて河床低下する)。簡単のためこの領域について断面平均し1次元解析によってrotational degradationの解析を行う。すなわちこの領域についての平均単位幅流量 q と河床勾配 i_b (水路中心軸の河床勾配) の関数として式(2)で掃流砂量 q_b の流下方向変化を算定、設定された時間刻みで式(3)より河床高変化を計算する。

$$q_B = K_G q (i_b - i_c); \quad i_c \equiv \frac{0.024g^{0.5}d^{1.5}}{C_f^{0.5}q} \quad (2)$$

$$\frac{\partial y_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\rho_0} \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} (B q_B) \quad (3)$$

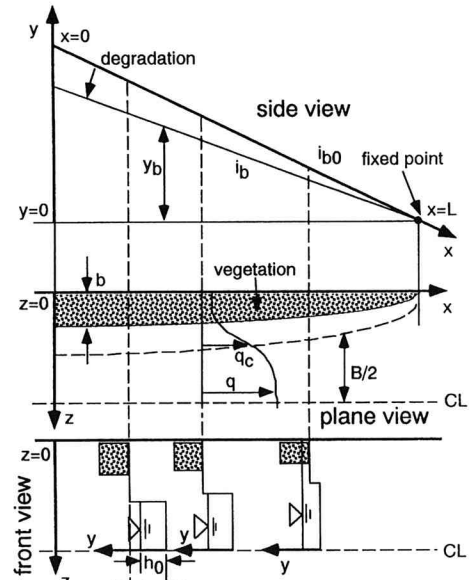


図1 説明図

ただし K_G : 定数, q : 単位幅流量, i : 河床材料粒径が与えられたときの限界勾配 (静的平衡勾配), y_b : 河床高 (水路中心での河床高), ρ_0 : 砂の空隙率である。上記の1次元解析はGessler¹⁾の方法にならったも

の⁴⁾である。

河床低下帯の元河床からの低下量 Δy は流下方向に単調減少するが、洪水後の低水の水深が h_0 であれば、 $\Delta y > h_0$ の領域は元河床が陸化し、次の洪水までに十分な時間があれば植生の侵入がある（植生帯と河床低下帯との間の上流の一部に植生侵入があるが、下流部のこの帯状部分は河床低下量が小さく $\Delta y < h_0$ で陸化・植生帯化は起きない）。元河床より水位が十分大きな洪水（植生帯が冠水する程度であるが植生帯まで限界掃流力以上となるような大洪水ではない）が来れば、一部拡幅した植生帯の影響で、流れはさらに中央に集中しrotational degradationの生じる帯はせまくなる。このような流れも、水平2次元流解析によって計算し、その状態での河床低下帯を推定する。河床低下帯流量が集中する分、平衡勾配は初期に想定されるものより小さくなり、河床低下はさらに進行する（植生帯が拡幅することによる河床低下の深刻化）。こうした過程も上述の計算を繰り返すことで予測される。洪水後の低水状態では河床低下帯に流量が集中して新たに陸化するところが上流部に出現する。こうした繰り返しによって植生帯拡幅は次第に上流部に限られてき、また上流部での河床低下は相当に深刻なものとなってくる。

上述のような解析法に基づいて、次の条件での植生繁茂を想定した場合としない場合で比較した計算例を示す。後述の水路実験との対応を考慮して、幅50cmの水路を想定、初期植生帯幅は $b_0=2.5\text{cm}$ （両側それぞれ）、初期勾配を $i_{b0}=1/100$ とした。植生帯の透過係数は $K_v=40\text{cm/s}$ を想定、河床材料の粒径は $d=0.27\text{cm}$ とした。また、洪水の流量（ Q ）は上述の現象の出現が明確な規模のものとし、ここでは $8000\text{cm}^3/\text{s}$ とした。

図2は初期植生帯に規定される洪水時の単位幅流量分布 $q(z)$ で、移動限界の検討から知られる河床低下帯を図に示している。河床低下の計算は時間刻み $\Delta t=0.1\text{s}$ で実行し、微小時間刻みでの河床低下量は式(3)の i_b を刻々変化する局所的河床勾配を用いて流砂量、河床変動計算を行った。図3は陸化・植生化を考えないで計算した河床高縦断形状についての結果で、90分以降の低下は小さくほぼ平衡勾配に達していると見られる。

90分で一旦洪水が終わって低水状態を迎えたことを想定する。このとき低水流量に応じて陸化する部分は異なる。ここでは簡単のため各断面での低水流量に対する等流水深を h_0 とみなして、陸化する限界位置を求めた。図4には低水流量による陸化域の出現する下流端位置 x_0 の変化を示したものである。ここでは、低水流量を $50\text{cm}^3/\text{s}$ に想定して陸化した領域を推定し、さらにそこが完全に植生域化（初期植生と同じ透過係数を持つ）して次の洪水（先と同規模）を経験することを想定して計算を継続した。このとき、新たに植生域化した領域が存在することを考慮して平面2次元解析により計算された単位幅流量 q の平面分布は図5に示すようである。この結果によって河床低下帯を限定した後、河床低下の計算を行った。このときの河床形状を図6に示す。河床形状は再びrotational degradationを呈しており、河床低下は深刻化している。こうした河床低下の助長は流量集中と河床低下帯が下流に向かって拡幅していることによっているものと考えられる。また洪水後の低水状態では上流でさらに陸化する領域が出てき、洪水と低水状態の繰り返しによってこうした現象が顕著になっていくことが推測される。

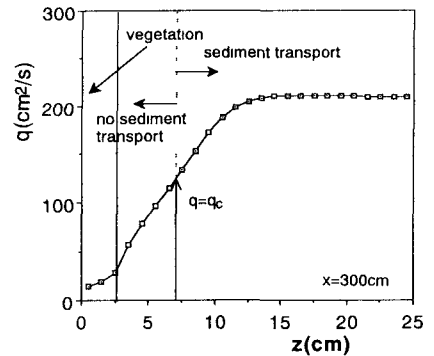


図2 初期植生帯に規定される洪水時の単位幅流量分布

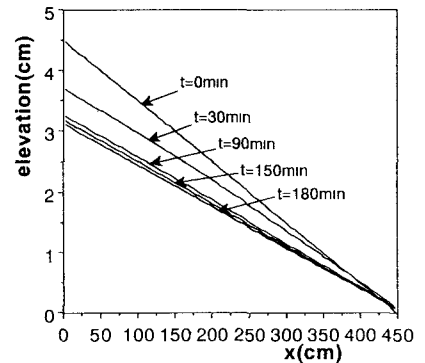


図3 河床高縦断形状（陸化・植生進出を考慮しない場合）

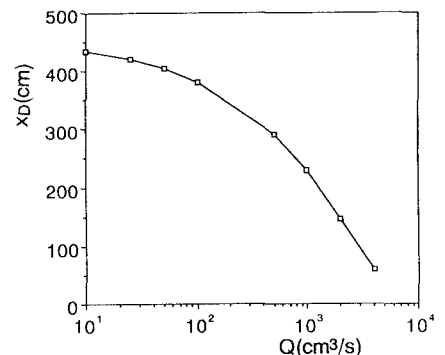


図4 低水流量の差による陸化域の変化

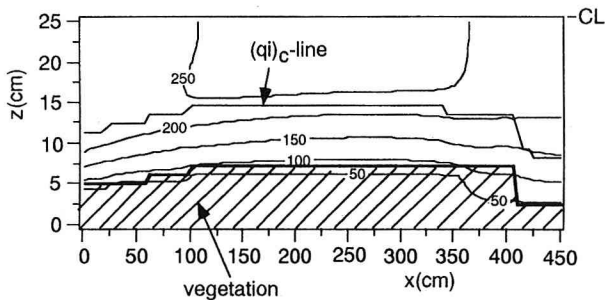


図5 植生の侵入により変化した洪水時の単位幅流量分布

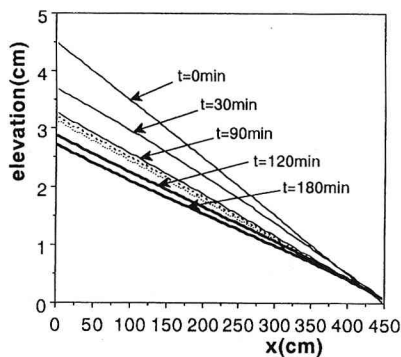


図6 河床縦断形状
(陸化・植生進出を考慮した場合)

3. 水路実験

上記の現象を実験室で再現する実験を行った。実験は2章の数値解析にあわせ、幅50cm、長さ12mの矩形断面直線水路において行った。水路の上流端より4.5mの位置から下流に向かって4.5mの長さにわたり水路幅いっぱい粒径0.27cmの礫を5cmの厚さで平坦に敷きつめて移動床とし、残りの河床は移動床部分と高さの同一となるようにかさ上げして固定床とした。水路勾配を1/100にセットし、初期状態として水路の側岸部には透水係数40cm/sの模擬植生（目の粗いフィルター材をほぐした超多孔体）を幅2.5cm分だけ設置して、洪水時を想定した流量8000cm³/sを通水した。通水後90、180分経過後には、一旦通水を止め、低水時を想定して水路に50cm³/sの水を供給して、このときの非水没領域（陸化域）を目視により判断するとともに、その領域に模擬植生を設置して、さらに通水を続けた。この間、河床の変化過程を観察するとともに、適当な時間毎に水路中心軸上における河床高さと水面高さをポイントゲージを用いて計測した。なお、本実験では河床には顕著な河床波や中規模河床形態は出現しなかった。

写真2は洪水を経た後の低水時における流路の様子を示したもので、写真より水路中央部のみが河床低下し、そこを低水時の流量が流れている様子がうかがえる。低水時に非水没領域と判断され、そのたびに設置・拡大された模擬植生域は図7に示すようである。本実験条件では、2回の洪水を経た後、植生域幅が最大で約15cm（片側）に達している。また、上流側の植生域幅が広く、下流に向かって植生域幅が狭くなる様子がわかる。

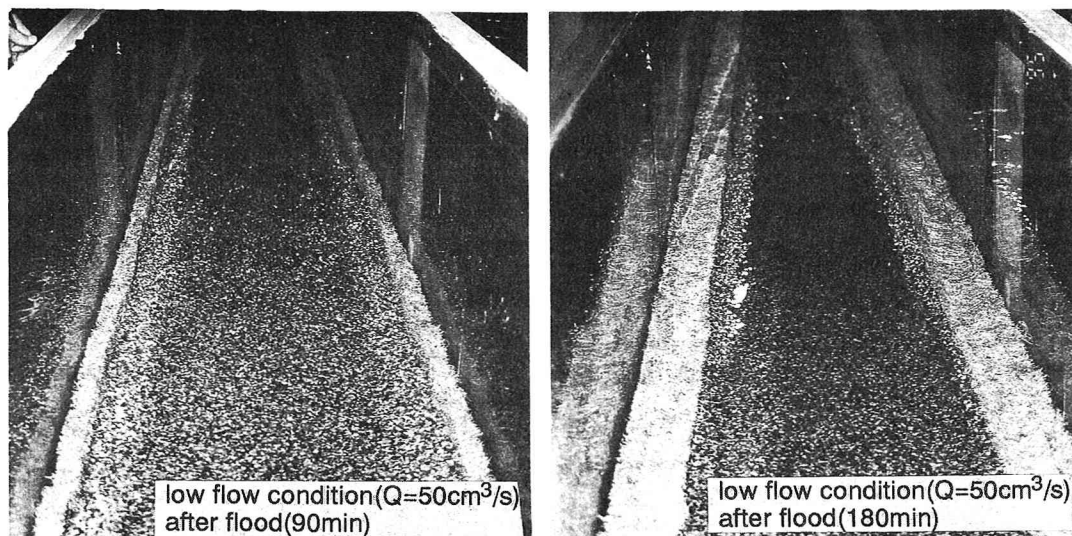


写真2 低水時における陸化（実験水路）

図8, 図9は河床高さ, 水面高さの時間変化をそれぞれ示したものである。初期植生域状態（通水後0分～90分）ではほぼrotationalに河床低下が進行している様子がわかる。また, 河床高さが低下するにつれて水面高さも低下しており, この段階では等流近似による河床低下の解析が妥当な結果を与えるものといえよう。その後, 植生域が新たに設置されると, 植生域の存在による抵抗増加のために水面は一時的に上昇するものの, 河床低下の進行とともに水面高さはやはり低下し, 等流近似による解析はそれほどまずいものでないと判断される。植生域が進出した状態（通水後90分～270分）では, 河床低下は下流側がむしろより進行する傾向がうかがえる。これは, 植生域が進出していくと, 植生域の分布が上流側で広く下流側で狭い分布となり, 下流に向かって河床低下領域幅が広がるためであると考えられる。

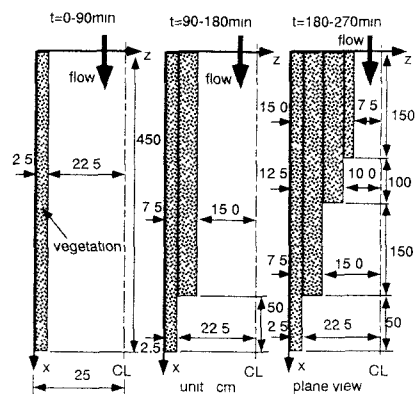


図7 模擬植生の配置

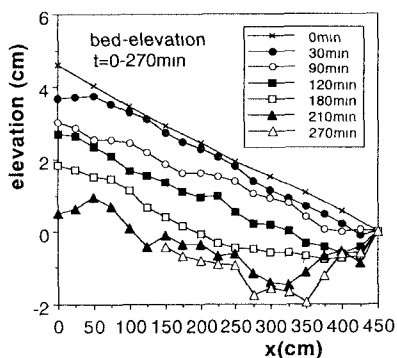


図8 縦断河床高の時間変化

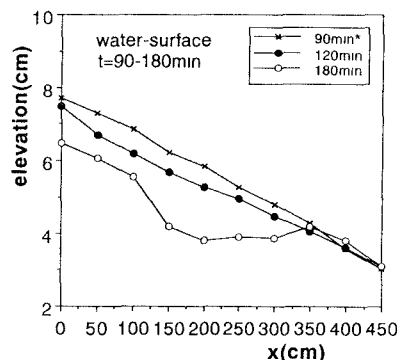


図9 水面形の時間変化 (2)

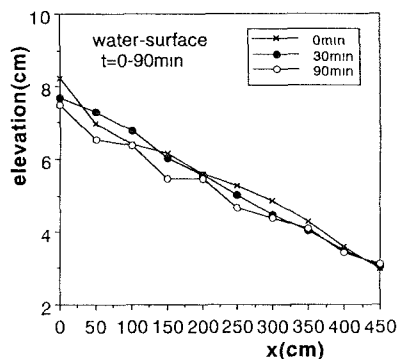


図9 水面形の時間変化 (1)

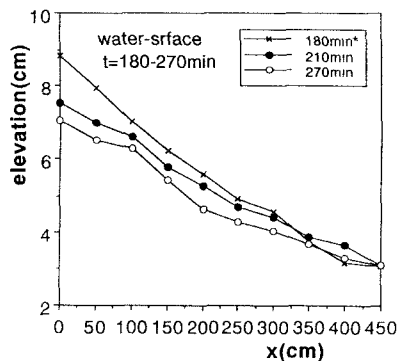


図9 水面形の時間変化 (3)

4. あとがき

本研究では, 植生帯が存在する流路では中洪水で植生帯の影響で非植生域にも上砂移動がおきないゾーンがあり, 河床低下が主流路幅の一部に限られる場合, 洪水後河床低下した部分だけで水を流しそれ以外が陸化し, 植生帯化してくる可能性を示した。こうした状況で洪水を経験すると流れはさらに中央に集中, 河床低下は中央に集中し植生帯の発達しなかった場合の平衡勾配を越えて進むことがわかった。洪水の規模, 低水状態, 植生繁茂機会としての出水間隔などが現象を支配する。これらは流況と大きくかかわっており, 流況制御, 植生繁茂対策などが河川環境管理上の重要な鍵であることが示された。このような, 流況, 河道動態, 植生, 水流, 流砂からなる相互作用系を的確に理解するための冒険的なシナリオ作りをし, 流況のモデル化, 模擬植生とその変化のモデルを取り込んで, 水流, 流砂の実験・数値解析を試み, 河川環境管理を議論するに当たっての新しい方法を提案した。今後, 実現象とのギャップを埋めて解析の向上もはかっていきたい。

本研究の遂行に当たって, 河川整備基金 (代表: 辻本哲郎) による援助を得た。記して謝意を表します。

補遺 - 水平 2 次元解析

流れの解析にあたっては、辻本・清水⁵⁾による植生帯を伴う流れの平面 2 次元解析を踏襲したが、乱流モデルは k - ε モデルに改良した。すなわち乱流モデルには Rastogi & Rodi⁶⁾ による底面粗度効果を考慮した水深平均 k - ε モデルを用い、 k 、 ε 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。

$$\frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial z}(hW) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hU^2 - h\nu_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWU - h\nu_T \frac{\partial U}{\partial z}\right) = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h\nu_T \frac{\partial W}{\partial x}\right) - F_x - \tau_{bx} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hWU - h\nu_T \frac{\partial W}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW^2 - h\nu_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_T \frac{\partial U}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h\nu_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) - F_z - \tau_{bz} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hUk - h \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWk - h \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}\right) = P_k + P_{kv} + P_{kb} - h\varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hU\varepsilon - h \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW\varepsilon - h \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right) = C_1 \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{ve} P_{kv} + C_{be} P_{kb}) - C_2 h \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9); \quad P_k \equiv h\nu_T \left\{ 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

$$F_x \equiv \frac{1}{2} C_D \lambda h U \sqrt{U^2 + W^2} \quad (11); \quad F_z \equiv \frac{1}{2} C_D \lambda h W \sqrt{U^2 + W^2} \quad (12)$$

$$\tau_{bx} \equiv C_f U \sqrt{U^2 + W^2} \quad (13); \quad \tau_{bz} \equiv C_f W \sqrt{U^2 + W^2} \quad (14)$$

$$P_{kv} \equiv F_x U + F_z W \quad (15); \quad P_{kb} \equiv \tau_{bx} U + \tau_{bz} W \quad (16)$$

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、 ν_T : 渦動粘性係数、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギーの逸散率、 C_1 : 路床の摩擦抵抗係数、 C_D : 植生要素の抗力係数、 λ : 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_μ 、 C_1 、 C_2 、 σ_k 、 σ_ε 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⁷⁾、底面摩擦抵抗に関わる係数 C_{be} については Rastogi & Rodi⁶⁾ により次式から算定する。

$$C_{be} \equiv 3.6 \frac{C_2}{C_1} \frac{k}{\varepsilon} C_\mu^{1/2} C_f^{1/4} \frac{\sqrt{U^2 + W^2}}{h} \quad (17)$$

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 法によって解いた。境界条件には側壁、床面で対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た。

参考文献

- 1) Gessler, J.: Agradation and degradation, *River Mechanics*, edited by H.W. Shen, Chapter 8, Water Res. Pub., 1971.
- 2) 辻本: 手取川扇状地区間の河原の植物群落と河道特性, 金沢大学日本海域研報告, 25号, pp.83-99, 1993.
- 3) Shimatani, 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.
- 4) 中川・辻本: 移動床流れの水理, 技報堂出版, pp.296-297, 1986.
- 5) 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.
- 6) Rastogi, A.K. and W. Rodi: Predictions of heat and mass transfer in open channels, *Jour Hydraul Div*, ASCE. Vol.105, HY3, 1979.
- 7) 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.