

# 水路側岸に水没した植生群を有する開水路流れの平面二次元解析 Two Dimensional Horizontal Analysis for Open Channel Flow over Submerged Bank Vegetation

安瀬地一作\* 木ノ瀬紘一\*\* 島田正志\*\*\* 田中忠次\*\*\*\*

AZECHI Issaku KINOSE Koichi SHIMADA Masashi TANAKA Tadatsugu

## 1. はじめに

水路側岸に水没した植生群が存在している場合、流れは3次元構造となる。このような流れを解析するためには3次元解析が必要となる。しかし、3次元解析は解析法が複雑であることや、膨大な計算時間が必要であるため、あまり実用的ではない。

平面2次元解析は物理量を水深方向に平均化するため、水深方向に物理量が分布している場合にはこれらをモデル化する必要がある。水路側岸に植生群が水没した流れでは、植生の抵抗及び植生群の存在に起因する乱流構造がモデル化の対象となる。本報では、水没した植生群を有する流れのManning粗度係数を推定することを基本にモデル化した。乱流モデルには渦動粘性モデルを用い、Reynolds応力分布と流速分布から水深平均渦動粘性係数を導出した。これらから平面二次元流解析を行った。

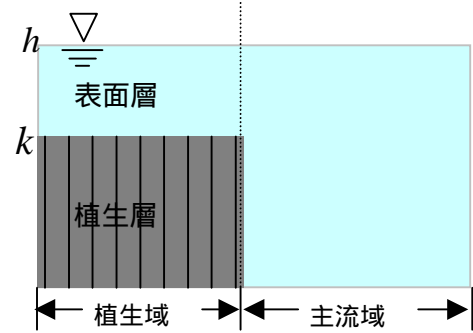


Fig.1 流れの概念図

Outline of Flow

## 2. Manning 粗度係数

水没した植生群が存在する流れのManning粗度係数を求める方法を示す。まず、流速分布を推定した。この分布を水深平均し、Manning式に適用することにより、水没した植生群を有する流れのManning粗度係数 $n_v$ を(3)式のように表した。

$$n_v = \frac{R^{2/3} \sqrt{\left(\frac{\beta}{2} C_D \lambda k + C_f\right) / gh}}{\frac{\alpha^2 k^2}{1 - \exp(-\alpha k)} \left\{ \frac{1}{\alpha^2 k h} \{1 - \exp(-\alpha k)\} + \ln\left(\frac{h}{k}\right) - \frac{h-k}{h} \left(1 - \frac{1}{\alpha k}\right) \right\}} \quad (1)$$

$\alpha = (\lambda C_D / 4 \kappa^2 k^2)^{1/3}$ ,  $u_*$ : 植生境界の摩擦速度,  $\ell_0 = \kappa k$ ,  $h$ : 水深,  $R$ : 径深,  $C_D$ : 抗力係数,  $\lambda$ : 植生存在密度,  $\kappa$ : カルマン定数,  $k$ : 植生高さである。  $\beta$  は運動量補正係数で、流速分布より、

$$\beta = 1 - \exp(-2\alpha k) / \frac{2}{\alpha k} [1 - \exp(-\alpha k)]^2 \text{ となる。}$$

## 3. 水深平均渦動粘性係数

植生域の水深平均渦動粘性係数はReynolds応力と流速分布から次のように求める。一般的に、Reynolds応力は渦動粘性係数 $\nu_t$ と流速分布 $u(z)$ を用いて、(2)式のように表される。

$$\tau_{zx} = \rho \nu_t \frac{du(z)}{dz} \quad (2)$$

また、流速分布およびReynolds応力分布はそれぞれ植生層では指数分布、植生層では対数分布す

\*日技クラウン(株), Nichigi Crown INC. \*\*茨城大学農学部, Faculty of Agriculture, Ibaraki Univ. \*\*\*筑波大学大学院生命環境科学研究科, Graduate School of Life and Environmental Sciences, Univ. of Tsukuba \*\*\*\*東京大学大学院農学生命科学研究科, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo  
Key Word 植生群を有する流れ, Manning粗度係数, 渦動粘性係数, 平面二次元解析

ることが実験的・理論的に確かめられており次のように表される．

### 流速分布

$$\text{植生層} (-k < z \leq 0) \quad u(z) = \frac{u_*}{\alpha \kappa} \exp(\alpha z) \dots (3) \quad \text{表面層} (0 < z \leq h') \quad u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{k} + 1\right) + \frac{u_*}{\alpha \kappa} \dots (4)$$

### Reynolds 応力分布

$$\text{植生層} (-k < z \leq 0) \quad \tau_{zx} \equiv -\overline{u'w'} = \rho u_*^2 \exp(\alpha' z) \dots (5) \quad \text{表面層} (0 < z \leq h') \quad \tau_{zx} \equiv -\overline{u'w'} = \rho u_*^2 (1 - z/h') \dots (6)$$

ここで， $u_*$ ：植生層境界の摩擦速度， $\alpha'$ ：Reynolds 応力分布係数である．

これらを(1)式に代入すると，各層の渦動粘性係数分布 $\nu_t(z)$ が次のように求まる．

$$\text{植生層} (-k < z \leq 0) \quad \nu_t(z) = u_* \kappa k \exp[(\alpha' - \alpha)z] \dots (7) \quad \text{表面層} (0 < z \leq h') \quad \nu_t(z) = \kappa u_* (z + k)(1 - z/h') \dots (8)$$

さらに，(7)，(8)式を水深平均することにより水深平均渦動粘性係数が(9)式ように求まる．

$$\nu_{tv} = \left[ \left( \frac{h'}{6} + \frac{k}{2} \right) h' + k \left( \frac{1}{\alpha' - \alpha} \right) (1 - \exp\{-k(\alpha' - \alpha)\}) \right] \frac{u_* \kappa}{h' + k} \quad (9)$$

## 4. 平面二次元解析法

基礎方程式は水深平均された連続式と，運動方程式を用いる．水深平均された連続式及び，流下方向(x 方向)，水深方向(y 方向)の運動方程式はそれぞれ，(10)，(11)，(12)式である．

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + g i_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t \left( \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] - U \sqrt{U^2 + V^2} \frac{gn^2}{h^{4/3}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y} + g i_y + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2\nu_t \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] - V \sqrt{U^2 + V^2} \frac{gn^2}{h^{4/3}} \quad (12)$$

ここに， $h$ ：水深， $x$ ：流下方向距離， $y$ ：横断方向距離， $t$ ：時間， $U$ ： $x$ 方向水深平均流速， $V$ ： $y$ 方向水深平均流速， $g$ ：重力加速度， $i_x, i_y$ ： $x$ 方向・ $y$ 方向水路勾配， $n$ ：Manning 粗度係数である．

植生領域の渦動粘性係数には(9)式を，Manning 粗度係数には(1)式を用い，平面 2 次元解析を行った．差分法には ADI 法 (Alternating Direction Implicit Method)を用いた．

## 5. 実験及び結果

実験は幅 30cm 全長 16m の可変勾配水路で行った．模擬植生として，変形しない剛なアルミ棒(直径 2mm)を用いた．模擬植生群は，穴 2.5mm，ピッチ 4mm のパンチング板を厚さ 5cm の発泡スチロールの上に貼り付けたものを水路に設置し，パンチング板の穴にアルミ棒を差し込むことで作成した．本実験では，測定区間は 8m で，高さ 10cm の模擬植生を水路左岸 15cm の幅で測定区間入り口から 1m 流下後の地点から下流端までの 7m に渡って設置した．Fig.2 は水面形の解析結果と実験結果，Fig.3 は測定区間入り口から 5m 流下後の横断流速分布の解析結果と実験結果である．それぞれ が実測値，\* が解析結果である．水面形については，解析結果は実測値を良好に再現できている．流速分布は概ね実測値を表現できてはいるものの，植生域・主流域境界付近ではうまく再現できていない．これは，境界付近の乱流構造が的確に表現できていないためである．今後，詳細なこの乱流構造の解明とそのモデル化が必要である．

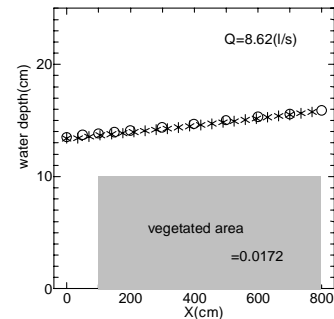


Fig.2 水面形  
Water Depth

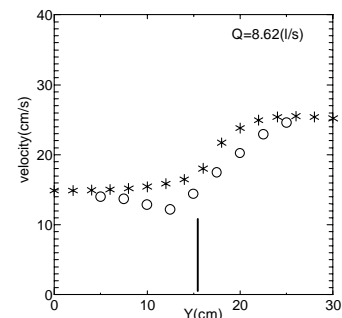


Fig.3 横断流速分布  
Lateral velocity distribution