

平衡植生流れと浮遊砂輸送に関する数値計算

Numerical Study on Characteristics of Turbulent Flow and Suspended Sediment Transport in a Vegetated Channel

清水義彦*・辻本哲郎**・小葉竹重機*

By Yoshihiko SHIMIZU, Tetsuro TSUJIMOTO and Shigeki KOBATAKE

A numerical simulation model on depth-average flow field with vegetation has been developed based on the concept of large-eddy simulation. The present model can reproduce the characteristics of transverse shear layer caused by the interaction between vegetation zone and non-vegetation zone, with good agreements to the experimental results. The present model is also applied to the suspended sediment transport in fully developed flow with vegetation and the variations in the lateral distribution of suspended sediment concentration are predicted numerically.

Keywords : depth-averaged flow simulation, flow with vegetation zone, large-eddy simulation, concentration profile of suspended sediment

1. まえがき

十分発達した植生帯を伴う流路では顕著な水平せん断層が生まれ、移流される低周波の渦構造が出現し、これが流路横断方向での運動量混合に大きな役割を果たしていることが指摘されている^{1)・2)・3)・4)}。また、横断混合は運動量の横断フラックスのみならず土砂輸送にも影響し、とくに浮遊砂の横断フラックスを強く規定するものと考えられる。最近、こうした組織的渦構造をもつ流れ場の解析が進み^{5)・6)}、実験的研究と相まって流れの構造の解明に貢献している。しかし、浮遊砂輸送の問題は平均流的な扱いから展開されているものの^{7)・8)・9)}、その非定常な構造(周期的横断混合)を直接取り入れた形では議論されていない。周期的横断混合がある場合、それに起因した非定常な浮遊砂輸送が生じ、条件によっては平均値と言えども従来より指摘されている平衡濃度分布(指数型分布⁸⁾)とは大きく異なることが予想される。

本研究では、はじめに、LESにもとづく平面二次元流数値計算から流れ場の非定常構造を抽出し、それが浮遊砂輸送に及ぼす影響を検討する。

* 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科
(〒376 桐生市天神町1-5-1)

** 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2-40-20)

2. ラージエディ・シミュレーションによる平面2次元流数値計算

植生流路での平面せん断層は二次元性が強く^{1), 2)}, 水深方向を平均化した平面2次元流解析が有効である^{4), 5), 6), 10)}. 八木・灘岡⁵⁾は浅い水域での乱流場を水深を基準スケールとして, 水平大規模渦運動と水深スケール以下の三次元的な乱流運動 (SDS turbulence) の2つに分離できるとし, SDS turbulence の長さスケールが水深に比例するとした1方程式乱流モデルを展開して大規模渦構造を計算している. これに対し, 著者らは水平大規模渦運動との分離 (粗視化) スケールは水深を基準とするのではなく, コントロールボリューム・スケールを基準とした乱流モデルを提案する. これはsubgrid scale (SDS turbulence) の流速変動相関項 (いわゆるレイノルズ応力) は単に水深に依存したスケールで決まるのではなく, 流れの解像度に依存するという考えで, より一般性を持たせる流れの解析としては現象に応じて粗視化のスケールを変える必要がある. これはLESの思想そのものに相当し, しかも平面2次元流の枠組みで現象を記述することは, 水柱のコントロールボリュームに依存したスケールで流れ場を粗視化することに他ならない.

そこで, 本研究ではLESの概念に立脚して流れの粗視化スケールを水柱の空間格子に対応させた平面2次元流解析 (Depth-averaged LES model) を行い, それを植生流路の平衡乱流場に適用する.

2-a) 基礎式

植生粗度を伴う流路の流下 (x) 方向, 流路横断 (y) 方向の運動量輸送に関する平面2次元流解析の基礎式は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{sgs} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{sgs} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + S_u \\ S_u &\equiv \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{sgs} \frac{\partial M}{\partial x} - \frac{3}{2} K_{sgs} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{sgs} \frac{\partial N}{\partial x} \right) - gh \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) - C_f u \sqrt{u^2 + v^2} - F_x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{sgs} \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{sgs} \frac{\partial N}{\partial y} \right) + S_v \\ S_v &\equiv \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{sgs} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{sgs} \frac{\partial N}{\partial y} - \frac{3}{2} K_{sgs} \right) - gh \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) - C_f v \sqrt{u^2 + v^2} - F_y \end{aligned} \quad (2)$$

また, 流体の質量保存式は,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

となる. ここに, $M \equiv uh$, $N \equiv vh$ (u, v, h : 流下, 横断方向流速, 水深), g : 重力加速度, z_b : 河床高さ, C_f : 河床の摩擦抵抗係数, F_x, F_y は植生粗度による抗力の反力の x, y 成分で, λ を植生の密生度 (流体の単位体積に占める植生の遮蔽面積), C_D を抗力係数として,

$$F_x \equiv (\lambda h C_D) u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad F_y \equiv (\lambda h C_D) v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

と書ける. 添字のsgs (subgrid-scale) は水柱のコントロールボリュームスケール内の乱流運動からの寄与を示し, v_{sgs}, K_{sgs} はそのスケールでの渦粘性係数, 乱れエネルギーである. v_{sgs} を与えるに際して, Smagorinsky model の拡張とも言える Yoshizawa & Horiuti の一方程式モデルを援用すると¹⁵⁾,

$$v_{sgs} \equiv C_v \Delta K_{sgs}^{1/2}, \quad \varepsilon = C_\varepsilon K_{sgs}^{3/2} / \Delta \quad (5)$$

となり, K_{sgs} は次式から与える.

$$\frac{\partial K_{sgs} h}{\partial t} + \frac{\partial u K_{sgs} h}{\partial x} + \frac{\partial v K_{sgs} h}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{sgs} h \frac{\partial K_{sgs}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{sgs} h \frac{\partial K_{sgs}}{\partial y} \right) + S_k \quad (6)$$

ここで, ソース項は, $S_k \equiv (P_k + P_{kveg} + P_{kv} - \varepsilon)h$ であり, この中の P_{kveg} は植生の形状抵抗によって産まれるコントロールボリュームスケール内の乱れエネルギーの生成項で^{11), 12), 13), 5)},

$$P_{kveg} \equiv C_{fk}(F_x u + F_y v) \quad (7)$$

と与える。その他の項については、

$$P_k \equiv v_{sgs} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right], \quad P_{kv} \equiv C_f (u^2 + v^2)^{3/2} \quad (8)$$

であり、後者はRastogi & Rodi¹⁴⁾による底面シアアによる乱れエネルギーソース項である。sgsの長さスケール Δ については、平面2次元流解析の粗視化スケールと合わせて、

$$\Delta = (h\Delta x\Delta y)^{1/3} \quad (9)$$

を与えることが妥当である。モデル定数は標準値にもとづき設定した($C_v=0.1$, $C_e=1.0$, $C_{fk}=1.0$)。

2-b) 数値計算の方法

基礎式をコントロールボリュームについて積分したのち離散化し、計算は陽解法により進める。差分化のスキームとしては、基礎式の移流項には二次元のQUICKスキームを用い、時間積分にはAdams-Bashforthスキームを用いた。この差分スキームの組み合わせは、例えば、木村・細田により死水域を伴う開水路流れの非定常平面二次元流計算に適用され、大規模渦構造を良好に再現している¹⁶⁾。側岸境界ではスリップ条件、流下方向には周期境界条件を課し、乱流計算の初期条件として平均流速の1.2%程度の大きさをもつランダムノイズを与え、平均流構造が定常になるまで計算を進めた。

2-c) 実験結果に対する再現計算

ここでは、水路半断面(水路幅 $B=50\text{cm}$ 、植生幅 $B_v=25\text{cm}$)に植生帯をもつ流路において計測された流れ場の構造と(流量 $Q=5379\text{cm}^3/\text{s}$ 、平均水深 $h_0=3.87\text{cm}$ 、水路床勾配 $i=0.00294$ 、植生密度 $\lambda=0.1/\text{cm}$)、それに対して数値計算から求められた結果を比較することにより、本計算法の妥当性を検討する。

図1は水面形、図2は主流速の計算結果を示したもので、実験結果から指摘されているように^{1), 2)}、水面形は横断方向に同位相で縦断方向に山・谷を形成し、主流速も横断方向には指数型の分布を持ちながら縦断方向に周期的に変動している。また、計算ではこうした変動が流下方向に移流されていることが認められた。図3は流速ベクトル場の計算値(但し横断方向流速は3倍に拡大して表示)で、植生・非植生域での交替的な流出入の存在が実験からも指摘されるように存在している。

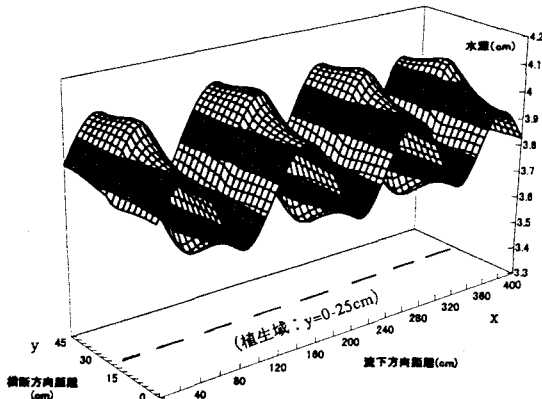


図1 水面形分布

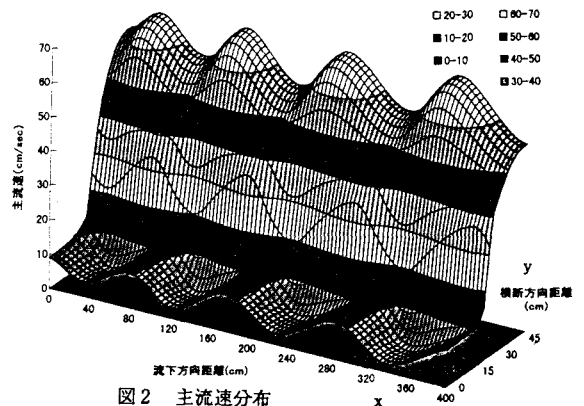


図2 主流速分布

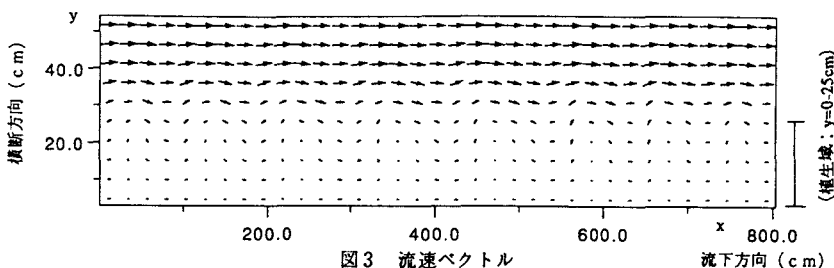


図3 流速ベクトル

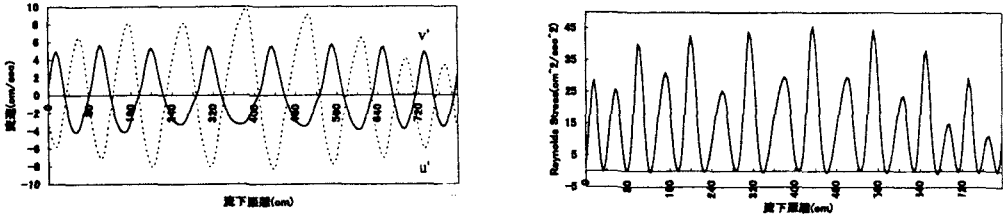


図4 縦断・横断方向の流速変動 (u' , v') とその相関 ($u'v'$) の流下方向変化

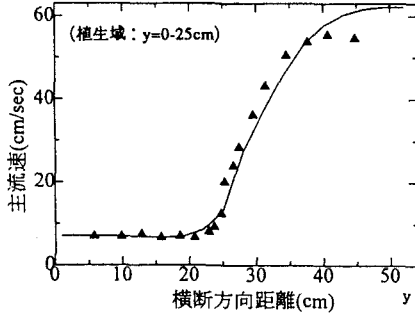


図5 主流速の平均分布 (計測値との比較)

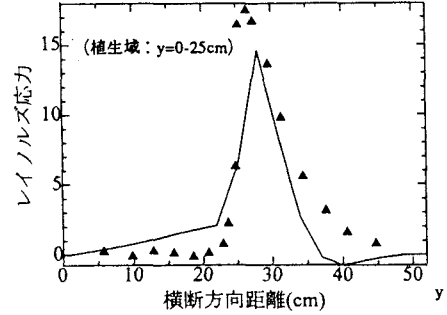


図6 横断方向レイノルズ応力分布 (計測値との比較)

平衡な植生流場では植生境界付近で、縦断、横断方向変動流速の位相差がほぼ π となって最も効率よく横断方向レイノルズ応力を産むことが実験より確認されている^{2), 17)}。そこで、図2の主流速の空間平均から縦断変動流速を求め、植生境界付近の縦・横断方向変動流速、およびその相関 ($u'v'$) の空間変化を図4に示すと、上述した乱流構造の一面も計算結果は良好に表現できている。図5, 6には、主流速、横断方向レイノルズ応力の平均値について計測値 (▲印) と計算値 (実線) の比較を示したが、両者の対応は良好である。以上から本計算モデルによる流れ場の再現性が確認され、モデルの有効性が示された。

3. Depth-averaged LES model を用いた浮遊砂濃度の数値シミュレーション

3-a) 浮遊砂濃度の基礎式

植生流路での浮遊砂輸送は、横断方向の掃流砂フラックスが存在しないとき、横断混合による移流フラックス、沈降による河床へのフラックス及び河床からの巻き上げによる浮遊砂生成の3つから構成される^{8), 9), 11)}。このうち、沈降と巻き上げはコントロールボリュームスケール内の浮遊砂運動として扱われ、これらは基礎式の中でソース項 (S_{sc}) として記述される。このとき、平面二次元の浮遊砂濃度 (C) の輸送式は次式となる。

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial uCh}{\partial x} + \frac{\partial vCh}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta v_{sgs} h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta v_{sgs} h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S_{sc} \quad (10)$$

ここに、

$$S_{sc} \equiv K_{sc} \left(\frac{u_*}{v_s} \right)^2 v_s - \alpha_c v_s C \quad (11)$$

であり、 u_* : 摩擦速度、 $1/\beta$: 乱流シュミット数、 S_{sc} の右辺第一項は河床から巻き上げフラックス、第二項は沈降フラックスを表す^{5), 7)}。 K_{sc} は無次元係数で既往の研究から 6.7×10^{-5} 程度となり⁵⁾、沈降速度 v_s は Rubey の式から与える。 α_c は水深平均濃度と底面濃度の関係を与える係数で、濃度の鉛直分布を指数分布とすれば、

$$\alpha_c = \frac{v_s h}{\epsilon_{sz}} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{v_s h}{\epsilon_{sz}} \right) \right\}^{-1} \quad (12)$$

である (ϵ_{sz} は浮遊砂の鉛直方向拡散係数)⁵⁾。

濃度輸送式の離散化は流れの計算と同様であり、側岸は対称な壁の条件を課した。なお、平衡状態の流れ場での浮遊砂輸送を計算するにあたっては、はじめに十分発達した流れ場を求め、その後浮遊砂輸送の計算を実行した。

3-b) 平衡状態での浮遊砂濃度分布

図7, 8は計算された平衡濃度分布(瞬間値)の流下, 横断方向の分布形で、沈降速度と摩擦速度の比 (v_s/u_*) をそれぞれ変えて示した。 v_s/u_* が大きい場合、主流域では濃度の高低差が縦断方向に顕著に現れ、横断分布形は従来より指摘されている指数型に近い分布となっている。一方、 v_s/u_* が小さい場合では縦断方向のそうした傾向は薄れ、また、横断分布形は指数型分布のように横断方向に一様な変化とはならず、植生の境界付近にピークをもつ形となっている。そこで、流下方向について空間平均値をとって、濃度分布を描いたものを図9に示すと、こうした分布形の変化が v_s/u_* に依存して生じることがわかる。これは、流速の周期的変動成分が浮遊砂の巻き上げを非線形的に助長するために起こるもので、 v_s/u_* が小さいほど、すなわち浮遊砂が卓越するほど顕著となる。

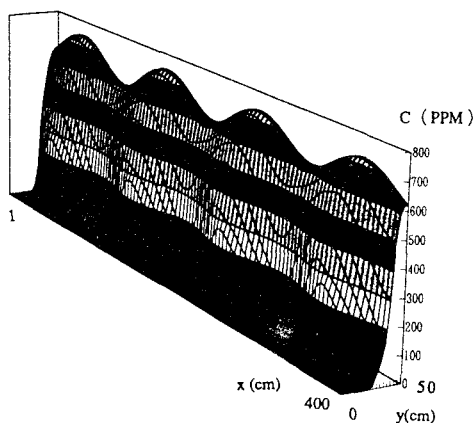


図7 平衡濃度分布 ($v_s/u_* = 0.180$)

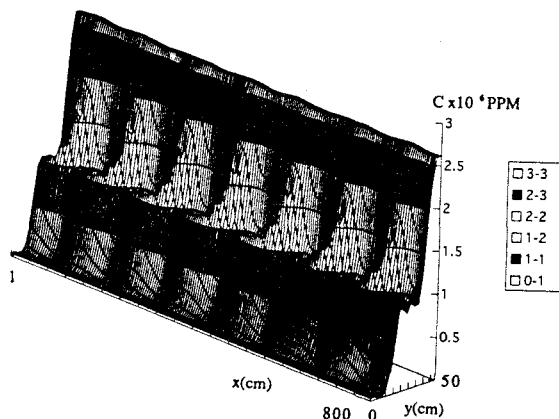


図8 平衡濃度分布 ($v_s/u_* = 0.003$)

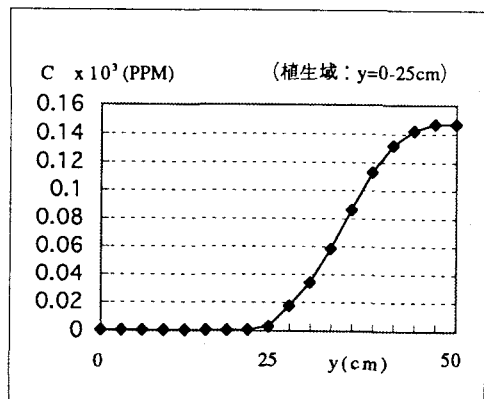


図9-a 平衡濃度分布 (平均値, $v_s/u_* = 0.299$)

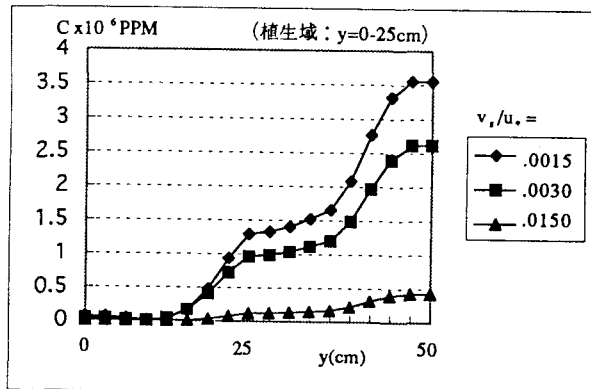


図9-b 平衡濃度分布 (平均値)

図10は計算濃度場の平面コンター図で、横断混合の強い植生境界付近の主流域では巻き上げの非線形効果と組織渦による移流フラックスによって周期的な濃度場が形成されていることが分かる。

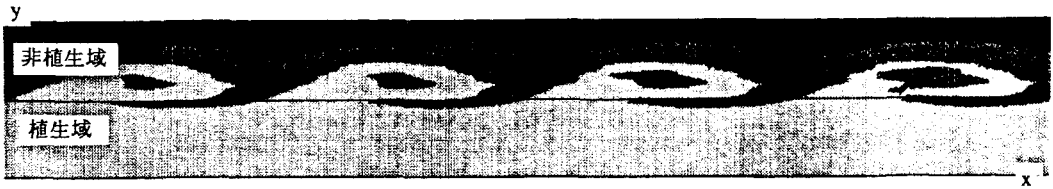


図10 濃度の平面コンター図

4. あとがき

本研究では、数値計算による平衡植生流れの非定常構造の抽出と、それによって平衡濃度場にも流れ場の組織構造が強く反映されることを示した。その結果、沈降速度・摩擦速度比が小さくなると、平衡濃度分布はいわゆる指数型分布からずれ、植生境界付近での濃度が高い形の分布に移行していくことを予測した。その特性は、流れを平均流のみから扱う方法では推定できず、横断混合を直接取り入れたアプローチでなければ議論できない。また、こうしたアプローチは植生流れ場での掃流砂輸送にも有効と思われる、今後検討を進めて行きたい。なお、本研究の流れの数値解析については IHW, ETH-Zurich (スイス連邦工科大学チューリッヒ校) 滞在中 (1994年) に始めたもので、計算と現象の理解について議論を頂いた

A. Muller 博士と、研究助成を頂いた日本学術振興会 (特定国派遣研究者助成), Swiss National Science Foundation (No. 83JS-039849) に謝意を表す。また、計算結果の整理について群馬大学大学院修士課程・茂木宏一君の協力を得たことを記して謝す。

参考文献

- 1) 藤田光一・福岡捷二：洪水流における水平混合，土木学会論文集，No.429/II-15，pp.27-36，1991.
- 2) 辻本哲郎・北村忠紀：側岸に沿って植生群落のある流路での水面変動を伴う横断混合，水工学論文集，第36巻，pp.273-280.
- 3) 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-16，pp.47-54，1991.
- 4) 石川忠晴・高橋和明・細井俊一：河岸植生付近の横断混合流れの位相平均解析，水工学論文集，第37巻，pp.837-840.
- 5) 瀧岡和夫・八木宏：SDS & 2DH モデルを用いた開水路せん断乱流の数値シミュレーション：土木学会論文集，No.473/II-24，pp.35-44，1993.
- 6) 福岡捷二・渡邊昭英・津森貴行：樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造とその解析，土木学会論文集，No.491/II-27，pp.41-50，1994.
- 7) 池田裕一・浅枝隆・須賀克三：円柱群が河床の形成に与える影響，第33回水理講演会論文集，pp.325-330，1989.
- 8) 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.
- 9) Tsujimoto, T. & Shimizu, Y.: Flow and suspended sediment in a compound channel with vegetation, Proc. 1st Int. Symp. Habitat Hydr., Trondheim, Norway, pp.357-370，1994.
- 10) 清水義彦・辻本哲郎：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.
- 11) Wilson, N.R. and Shaw, R.H.: A high order closure model for canopy flow, Jour. of Applied Meteorology, Vol.16, pp.1197-1205, Nov., 1977.
- 12) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次：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.
- 13) 神田 学・稲垣 聡・日野幹雄：植生一大気境界面における大規模渦構造と運動量交換に関するLES モデルによる検討，土木学会論文集，No.461/II-22，pp.39-48，1993.
- 14) Ashok K. Rastogi & Wolfgang Rodi: Prediction of heat and mass transfer in open channels, Jour. of the hydraulics division, ASCE, HY3, pp.397-420, March, 1978.
- 15) Yoshizawa, A & Horiuti, K.: A statistically-derived subgrid-scale kinetic energy model for large-eddy simulation of turbulent flows, Jour. of the Physical Society of Japan, Vol. 54, No.8, August, 1985, pp.2834-2839.
- 16) 木村一郎・細田 尚：側岸に死水域を有する開水路流れの非定常解析，ながれ，日本流体力学会，Vol.12, pp.399-408，1993.
- 17) 岩田美幸：植生を有する場における流れ構造に関する研究，京都大学修士論文，1990.