

植生層構造の不安定現象としての穂波の形成機構

Formation of Honami Motion as Instability of Vegetation-Layer Constistution

辻本哲郎*・北村忠紀**・中川博次***

By Tetsuro TSUJIMOTO, Tadanori KITAMURA and Hiroji NAKAGAWA

In the open-channel flow over flexible vegetation, the so-called honami motion is sometimes observed, which has relatively low frequency. The spatial heterogeneity of vegetation density in the vegetation layer when the honami behavior appears, and such a fact is focused to analyze the flow with a heterogeneous vegetation layer. By coupling such an analysis of the flow with the model for deformation of an individual plant, a linear instability analysis of the interrelating system suggests the formation mechanism of honami.

Keywords: honami, flow over heterogeneous vegetation layer, deformation of plants by flow, k - ϵ turbulence model

1. ま え が き

流れに対して変形、揺動するような柔軟な直立性の植生層を伴う流れでは、穂波現象と呼ばれる植生の組織的な揺動を伴う場合がある。穂波現象についての研究は、Canopy flowの研究者の間で盛んに行われ、穂波が植生群落内外の運動量、質量輸送に影響を与えることが指摘された¹⁾。また、室田・福原²⁾は開水路流中においても、模擬植生を河床に設置した水路実験において穂波現象が生じることを観察した。

穂波現象が生じる要因として、池田ら³⁾は、植生層を伴う流れでは植生層境界付近で主流速分布が変曲点を持つために流れが不安定となって渦が生じ、それが下流へ流される際に柔軟な植生を押し倒すために、穂波が生じるものと考え、植生層境界に生じる渦の挙動を流れの可視化によって調べ、その3次元的な構造を検討した。同様な立場から、神田ら⁴⁾は流れによって変形しない剛な植生層を伴う流れ場について、LESによる検討から、植生層境界付近で組織的な渦構造が生じることを示した。これらの研究は、植生の剛性に関わりなく、流速分布の持つ不安定性により組織渦が生じることを示している。穂波現象の発生は、こうした流れの不安定に起因する組織渦の通過の現れという考えで説明はつくようであるが、組織渦の通過によって

* 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)

** 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)

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部環境地球工学教室

植生が組織的に変形することは、植生層厚や密生度といった植生層構造の空間的変化をもたらし、それが流れに対して影響を及ぼすであろうことも見逃してはならない。移動床開水路流れで、burstingなどの組織渦は河床波形成のトリガーではあるが、河床波が発達してくれば組織渦の構造は平坦河床のものと違ったものとなり、むしろ形成過程は平坦河床の組織渦構造と無関係に論じられる。こうした背景のもとで、本研究では、穂波の形成にむしろこうした植生層構造の空間的変化とそれによって出現する流れ場の相互作用系の不安定が支配的であると想定した線形不安定解析による穂波の形成機構の説明を試みた。

2. 解析のフレームワーク

穂波の形成に関する相互作用系は図1のように表され则认为。すなわち、何らかの要因によって空間的に変化する流れ場における個々の植生の変形が、植生層厚や密生度の空間変化を生じさせ、さらにそれによって流れ場が影響されるという相互作用系である。

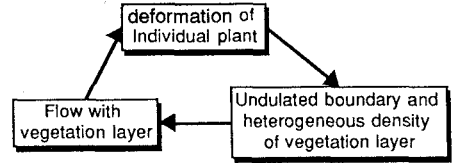


図1 穂波に関する相互作用系

個々の植生を直径 D 、長さ l_0 の円柱としてモデル化し、植生の変形は図2に示すように、植生の根元を中心とした回転運動で近似できるものとする。植生の傾き角を θ とするとき（垂直に立った状態を $\theta=0$ とする）、移流する正弦波状の変化 $\theta(x,t)$ は穂波を表し、 θ の摂動分 ψ_θ は次のように書ける。

$$\psi_\theta = a \sin(\kappa^* x^* - \omega^* t^*) \quad (1)$$

ここで、 $\psi_\theta \equiv \theta/\theta_0$ 、 θ_0 ：植生の平均傾き角、 a ： ψ_θ の振幅であり時間の関数、 $x^* \equiv x/h$ 、 $t^* \equiv tU_m/h$ 、 x ：流下方向座標、 t ：時間、 U_m ：断面平均流速、 h ：水深、 $\kappa^* \equiv 2\pi/L^*$ 、 $\omega^* \equiv 2\pi/T^*$ 、 $L^* \equiv L/h$ 、 $T^* \equiv Th/U_m$ である。

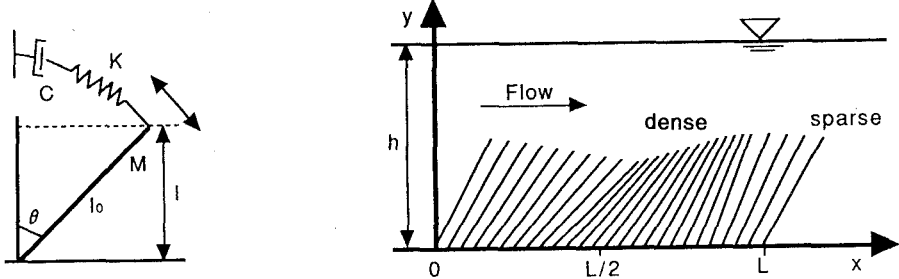


図2 植生の変形

個々の植生に働く流体力 F に対する植生変形の応答は次式で表されるものとする。

$$M \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + C \frac{\partial \theta}{\partial t} + K \theta = F \quad (2)$$

ここで、 M ：植生の質量（水中では付加質量も含む）、 K ：等価バネ定数、 C ：減衰定数である。流体力 F については、代表流速 U_{ref} を用いて、次のように書けるものとする。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D U_{ref}^2 \quad (3)$$

ここで、 ρ ：水の密度、 C_D ：植生の抗力係数である。流体力 F に擾乱がない場合、または F が流下方向に一定の場合、式(3)は平均的な植生の傾き角 θ_0 を与え、 θ_0 は次のようになる。

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \frac{1}{K} \rho C_D D U_{ref}^2 \quad (4)$$

流れが空間的に変化し、植生に作用する流体力が $F=F_0+F'$ のように変動する時、植生の変形も同様に $\theta=\theta_0+\theta'$ のように変動する。これらを式(2)、(3)に代入して線形化すると次式が得られる。

$$\alpha^2 \frac{\partial^2 \psi_\theta}{\partial t^{*2}} + 2\zeta_0 \alpha \frac{\partial \psi_\theta}{\partial t^*} + \psi_\theta = \psi_F \quad (5)$$

ここで、 $\psi_F \equiv F/F_0$ 、 $\alpha \equiv U_m/(\omega_0 h)$ ：平均流と植生固有の振動の時間スケールの比、 $\omega_0 \equiv (K/M)^{1/2}$ ：植生の固有振動数、 $\zeta_0 \equiv C/(2M\omega_0)$ ：無次元減衰率である。

植生層構造の空間変化に対する代表流速変動 ($\psi_U \equiv U_{ref}/U_{ref0}$)、流体力変動の応答は線形近似のもとでは次のように書ける。

$$\psi_U \equiv r_U a \sin(\kappa^* x^* - \omega^* t^* - \phi_U) \quad (6)$$

$$\psi_F \equiv r_F a \sin(\kappa^* x^* - \omega^* t^* - \phi_F) \quad (7)$$

ここで、 $r_U a$ 、 $r_F a$ ： ψ_U 、 ψ_F の振幅、 ϕ_U 、 ϕ_F ： ψ_θ に対する ψ_U 、 ψ_F の位相差であり、 r_U と r_F 、 ϕ_U と ϕ_F にはそれぞれ次の関係がある。

$$r_F = 2r_U \quad (8) \quad ; \quad \phi_F = \phi_U - l_0^* \kappa^* \sin \theta_0 \quad (9)$$

ここで、 $l_0^* \equiv l_0/h$ である。

今、振幅 $a(t^*)$ を次のように仮定する。

$$a(t^*) = a_0 \exp(\gamma \cdot t^*) \quad (10)$$

ここで、 a_0 ：擾乱の初期振幅である。この時、式(5)～(7)、(10)から若干の演算の後、擾乱の振動数、増幅率に関する次式が得られる。

$$\alpha \omega^* \equiv \frac{\omega}{\omega_0} = \pm \sqrt{\frac{1 - \zeta_0^2 - B + \sqrt{(1 - \zeta_0^2 - B)^2 + A^2}}{2}} \quad (11)$$

$$\alpha \gamma = \pm \sqrt{\frac{-(1 - \zeta_0^2 - B) + \sqrt{(1 - \zeta_0^2 - B)^2 + A^2}}{2}} - \zeta_0 \quad (12)$$

$$A \equiv r_F \sin \phi_F = 2 \left\{ r_U \sin \phi_U \cos(-l_0^* \kappa^* \sin \theta_0) + r_U \cos \phi_U \sin(-l_0^* \kappa^* \sin \theta_0) \right\} \quad (13)$$

$$B \equiv r_F \cos \phi_F = 2 \left\{ r_U \cos \phi_U \cos(-l_0^* \kappa^* \sin \theta_0) - r_U \sin \phi_U \sin(-l_0^* \kappa^* \sin \theta_0) \right\} \quad (14)$$

式(12)において、 $\gamma > 0$ のとき擾乱は不安定となって成長し、穂波現象が生じることになる。これらから擾乱の不安定性を調べるには、様々な植生条件、水理条件のもとで、振幅倍率 r_U 、位相差 ϕ_U を調べればよい。

3. 植生の組織的な変形によって決まる植生層の構造

植生の変形が式(1)のように組織的に変形するとき、植生層厚、植生密生度、植生の傾き角は空間的に変動する。植生密生度（単位体積当たりの植生の水流に対する遮蔽面積）は、 $\lambda \equiv D/s_1 s_2$ （ここで、 s_1 、 s_2 ：それぞれ流下方向、横断方向への植生の間隔である）で表現され、穂波現象の鉛直2次元での現象に着目するものとする、 s_2 は一定 (s_{20}) で、 s_1 は空間的に変化し ($s_1 = s_{10} + s_1'$)、 $\lambda \equiv \lambda_0(s_{10}/s_1)$ と書かれる。図3は λ を無次元化して表示したもの ($C^* \equiv C_0 \lambda_0$) の空間変動の例を示したものである。なお、図中、 C_0^* ：無次元平均植生密生度 ($\equiv C_0 \lambda_0$) である。また、図4は植生の傾き角の空間分布の例である。

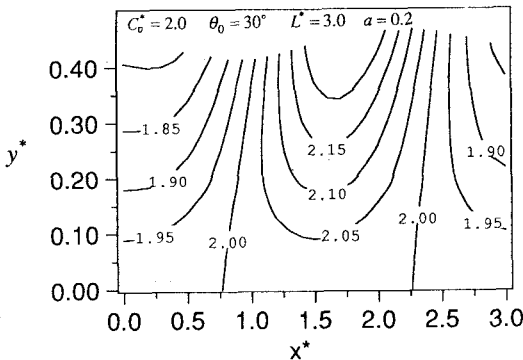


図3 植生密生度の空間変化の例

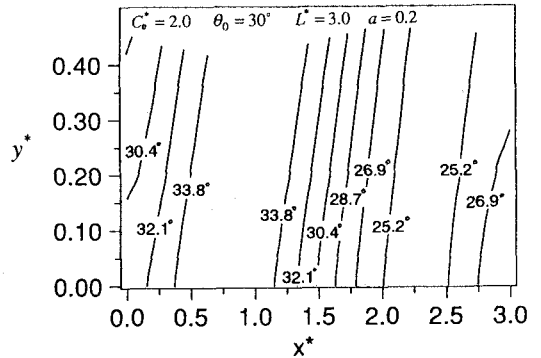


図4 植生の傾き角の空間変化の例

4. 非均質な植生層を伴う流れ場の推定

図3, 4に示されるような植生層構造が空間的に変動する植生層を伴う流れ場について, 準定常としての取扱いから評価するものとする. 清水ら⁵⁾による植生の形状抵抗を運動量式のみならず, k -, ε -方程式にも考慮した k - ε 乱流モデルを用いれば, 支配方程式は以下のである.

$$\frac{\partial U^*}{\partial x^*} + \frac{\partial V^*}{\partial y^*} = 0 \quad (15)$$

$$U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial U^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x^*} - F_x^* + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(2\Gamma^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left\{ \Gamma^* \left(\frac{\partial U^*}{\partial y^*} + \frac{\partial V^*}{\partial x^*} \right) \right\} \quad (16)$$

$$U^* \frac{\partial V^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial V^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial y^*} - F_y^* + \frac{\partial}{\partial x^*} \left\{ \Gamma^* \left(\frac{\partial U^*}{\partial y^*} + \frac{\partial V^*}{\partial x^*} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(2\Gamma^* \frac{\partial V^*}{\partial y^*} \right) \quad (17)$$

$$U^* \frac{\partial k^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial k^*}{\partial y^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{v_T^*}{\sigma_k} \frac{\partial k^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{v_T^*}{\sigma_k} \frac{\partial k^*}{\partial y^*} \right) + P_k^* + C_{rk} (F_x^* U^* + F_y^* V^*) - \varepsilon^* \quad (18)$$

$$U^* \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial y^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{v_T^*}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{v_T^*}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial y^*} \right) + \frac{\varepsilon^*}{k^*} \left[C_{1\varepsilon} \{ P_k^* + C_{fe} (F_x^* U^* + F_y^* V^*) \} - C_{2\varepsilon} \varepsilon^* \right] \quad (19)$$

ここで,

$$P_k^* \equiv v_T^* \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial U^*}{\partial x^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial V^*}{\partial y^*} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial U^*}{\partial y^*} + \frac{\partial V^*}{\partial x^*} \right)^2 \right] \quad (20)$$

$$v_T^* = C_\mu \frac{k^{*2}}{\varepsilon^*} \quad (21)$$

であり, $x^* \equiv x/h$, $y^* \equiv y/h$, $U^* \equiv U/U_m$, $V^* \equiv V/U_m$, U , V :それぞれ流下方向, 鉛直方向流速, U_m :断面平均流速, $P^* \equiv P/(\rho U_m^2)$, P :圧力, ρ :水の密度, $k^* \equiv k/U_m^2$, k :乱れエネルギー, $\varepsilon^* \equiv \varepsilon H_L/U_m^3$, ε :乱れエネルギーの逸散率, P_k^* :無次元乱れエネルギーの生成率, $v_t^* \equiv v_t/(U_m h)$, v_t :渦動粘性係数, $\Gamma^* \equiv v_T^* + 1/R_c$, $R_c \equiv U_m h/\nu$, ν :動粘性係数である.

植生による形状抵抗は植生に垂直な方向に働くものとし, 次のように与える.

$$F_x^* = \frac{1}{2} \frac{C^*}{l_0^*} \sqrt{U^{*2} + V^{*2}} (U^* \cos \theta - V^* \sin \theta) \cos \theta \quad (22)$$

$$F_y^* = -\frac{1}{2} \frac{C^*}{l_0^*} \sqrt{U^{*2} + V^{*2}} (U^* \cos \theta - V^* \sin \theta) \sin \theta \quad (23)$$

植生による形状抵抗に関する係数以外のモデル定数は, 標準 k - ε モデルの値, すなわち, $C_\mu=0.09$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ を用いた. また植生の形状抵抗に関する係数 C_{rk} , C_{fe} は, 流れによって変形しない, いくつかの異なる密度度の植生層を有する開水路流れでの実測値と計算値が合うように決められた値, $C_{rk}=1.0$, $C_{fe}=1.3$ を用いることとした.

計算領域は流下方向には植生の組織的変形の一波长分 L とし, 計算領域上下流端で周期境界条件を課した. 壁面からの第1格子点では対数則の成立と k , ε の局所平衡を仮定し, 水面では対称条件を課した. 支配方程式の解法は清水ら⁵⁾と同様である.

図5は主流方向流速, 鉛直方向流速の計算結果をコンター表示した例である. 図より, 植生層構造の空間変動によって, 主流が歪まされること, 鉛直方向流速が誘起されることがわかる.

個々の植生に作用する流体力を決定する代表流速 U_{ref} として, 平均的な植生高さ ($y^*=l_0^* \cos \theta_0$) の位置での主流速を用いるとすると, その非擾乱値からの摂動分 $\psi_0 \equiv U'_{ref}/U_{ref0}$ は図6に示されるようである. 図より ψ_0 は流下方向にはほぼ正弦波状に変化し, ここでは $\psi_0(x)$ がゼロクロスする位置から位相差 ϕ_0 を, ψ_0 の最大値から r_0 をそれぞれ求めた. 図7は $k^*(\equiv 2\pi/L^*)$ に対する $r_0 \sin \phi_0$, $r_0 \cos \phi_0$ の変化を示したものであり, それぞれについて近似曲線を当てはめた.

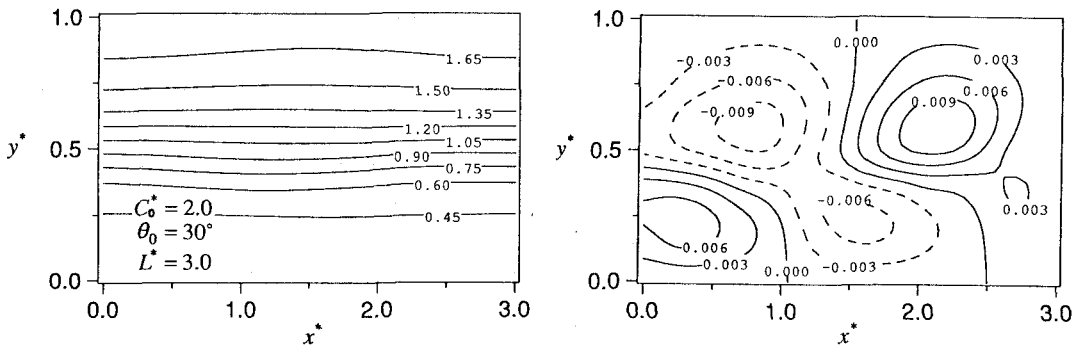


図5 主流速，鉛直方向流速の計算結果例

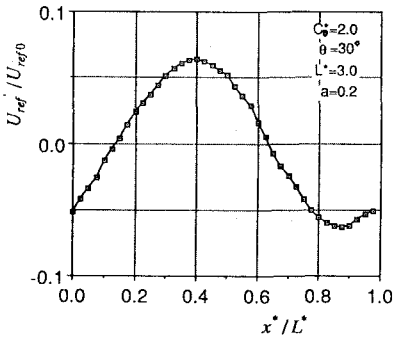


図6 代表流速の流下方向変化

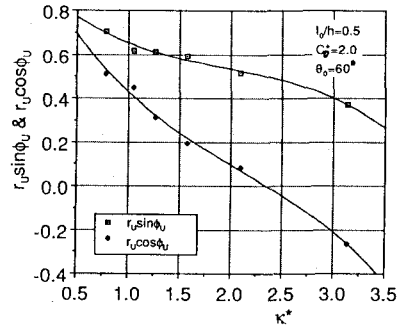


図7 \$\kappa^*\$と\$r_U \sin \phi_U\$, \$r_U \cos \phi_U\$の関係

6. 解析結果と考察

上述のシナリオの解析を数値計算によって実行した。以下には相対水深 \$l_0/h=0.5\$，植生密度 \$C_0^*=2.0\$ とし，植生の平均傾き角 \$\theta_0\$ を変化させた計算の結果を示す。図8は無次元化された擾乱の周期特性，不安定性（増

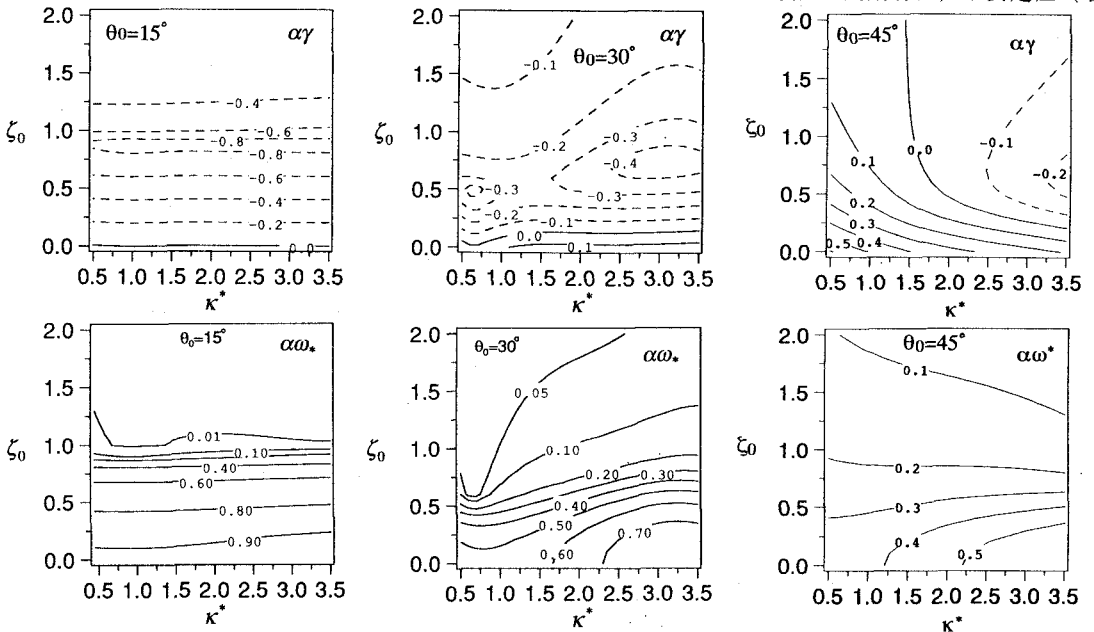


図9 不安定解析結果

幅率)を植生層を構成する植物要素の無次元減衰率と無次元波数を縦軸・横軸とした面($\zeta_0 \sim \kappa^*$ 平面)上にコンター表示したものである(擾乱の増幅率が負のところは破線でコンター表示している)。 ζ_0 は構成植物の材料特性を示すもので、空中では1.0以下のものがよく見られるが、水中では植物モデル要素の振動試験で過減衰となることからわかるように1.0を越えるものが多い。

図8の結果によると植物要素の平均傾き角 θ_0 が小さい場合(図の $\theta_0=15^\circ$ の場合)は不安定領域は認められないが、傾き角が大きくなって植生層内の密生度の非均質性が顕著になってくると ζ_0 の小さい条件から不安定性が出現する(図の $\theta_0=30^\circ$ の場合)。すなわちここで想定した相互作用系の不安定としての穂波現象が出現することになる。ただし水中ではこのように小さい ζ_0 となる条件はまれである。この穂波の周期は植物要素の固有周期に近い。またごく低波数域を除いて広い波数領域で不安定が出現する可能性を示している。植物要素の平均傾き角 θ_0 が大きくなるにつれ不安定領域は拡大する。このことは流速の増加に伴って穂波現象が発生しやすいという従来の観測結果と定性的に一致している。

傾き角がさらに大きくなると(図の $\theta_0=45^\circ$ の場合)、不安定領域は ζ_0 の大きい条件にも広がり、水中での穂波現象の出現も示唆する。この場合、 ζ_0 の大きい条件では不安定となる波数域が低波数域に限定され(高波数域では安定となる)、本論文でのシナリオである相互作用系不安定としての穂波が水中では(ζ_0 の大きい条件では)低波数域に限られることになる。またこの条件でのこれは経験的知見と一致している。また ζ_0 の大きい条件で出現する(不安定となる)擾乱は ζ_0 の小さい条件で出現するものより低周波で、水中での穂波現象が個々の植物の固有周期よりゆったりした動揺であるという観察結果とも定性的に一致している。

以上のような解析結果と空中、水中での穂波現象の特性との定量的比較はほとんど未着手でこれからの研究課題であるが、本論文に示す植生層の密生度の空間分布と流れ、個々の植物要素の変形からなる相互作用系の不安定が穂波の形成に役買っていることが確認された。

7. あとがき

本研究では、流れ場の推定の際、準定常を仮定して定常乱流モデルを用いているため、流れの不安定に起因する組織渦構造は考慮されていないが、植生層構造の空間変化とそれに付随する流れ場の相互作用系のみに着目するという立場からは、むしろこうした取扱いは好都合である。しかしながら、流れの不安定による組織渦構造と本研究で検討した植生層構造の空間変化のカップリングも考えられ、今後、両者をうまく融合させた検討が望まれる。

なお、解析にあたって、当時金沢大学大学院・長崎敏範君(現在、富山県土木部)及び京都大学大学院・藤井康嗣君の協力を得た。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 井上：穂波の研究，1.穂波の機構と特性，農業気象，第11巻，第1号，pp.18-22，1955.
- 2) 室田・福原：直立性の植物を有する開水路の流れ構造について，第28回水理講演会論文集，pp.225-231，1984.
- 3) 池田・金沢：可撓性を有する沈水性植生内外の流れ及び植生境界で発生する組織渦の3次元構造について，水工学論文集，第38巻，pp.345-350，1994.
- 4) 神田・稲垣・日野：植生－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.
- 5) 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.