

簡便なモデルを用いた水路群形成の理論

SIMPLIFIED THEORIES OF CHANNEL INCEPTION

泉 典洋¹・山口里実²

Norihiro IZUMI and Satomi YAMAGUCHI

¹正会員 Ph.D. 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-77 宮城県仙台市青葉区青葉)

²学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

It is often seen that channels are formed on slopes with constant spacings. In this study, a linear stability analysis is performed, with the use of simplified models, so as to investigate the mechanism of the wavelength selection in the case of both erosional and transportational channel inception. The theory can predict finite values of the characteristic wavelength except for the case of erosional channel inception due to subcritical flow. It is found, in the case of finite wavelength, that the spacings of the inception channels can possibly be of the order of the slope length and decrease as the Froude number F' increases. The theory also reveals that the normal flow assumption fails to predict the appearance of finite wavelength selection of channel inception.

Key Words : channel inception, channel spacing, erosion, sediment transport, linear stability analysis

1. はじめに

斜面上を流れるシートフローは地表面侵食によってほぼ等間隔で並んだ水路群を形成することがある。このような水路群が発達し、やがて河川となり谷となる。したがって地形形成のプロセスを解明するためには水路群の形成機構を明らかにすることが重要となる。

これまで多くの研究者が水路群の初期形成間隔を予測するモデルを提案しているが、実際に見られるような有限な水路間隔について合理的な説明のできるモデルはいまだに完成していない。たとえばこのような研究の草分けである Smith and Bretherton¹⁾は線形安定解析の手法を用いることで斜面上の水路の形成メカニズムを説明しようとした。しかし彼等のモデルで予測される水路群の初期間隔は無微小となってしまう、実際に見られるような現象を説明することはできない。

Smith and Bretherton¹⁾のものも含めてこれまでのほとんどの水路群形成の理論には、重力の斜面方向成分と底面摩擦力が完全に釣り合っているという仮定、すなわち等流近似のシートフローモデルが用いられてきた。このシートフローモデルは式形が単純であることから取扱が簡単であるという利点は有るものの、移流慣性の項が完全に無視されているため現実のシートフローの挙動を完全には表現できない。Izumi and Parker²⁾は、これまでの等流近似モデルが水路群の初期形成間隔を説明できなかったのはこの移流慣性項とレイノルズ応

力の無視に原因が有ると考え、横断方向に波状の擾乱が与えられた斜面上のシートフローの流速分布を解析的に求め、擾乱の波長が(水深/斜面勾配)のとき流れの集中が最大になることを明らかにした。しかし彼等の理論はあくまで流速の分布を求めたものであって、形成される水路の間隔が流れの集中する間隔に一致することを示唆することはできるものの、水路形成のプロセスを完全に説明できたとは言えない。

本研究では、等流近似のシートフローモデルに代えて移流慣性項を無視しない浅水方程式を用い線形安定解析を行うことによって、斜面上に形成される水路群の初期形成間隔を予測するモデルを提案する。とはいえ浅水方程式は複雑であり取扱が繁雑である。そこで仮想的ではあるが非常に単純な条件を想定することによって解析を容易にする。

2. モデル

(1) 斜面上に見られる水路群

図-1aは米国カリフォルニア州のコーストレンジの写真である。100 m程度の間隔で等間隔に並んだ水路群が見られる。図-1bは仙台市青葉区作並付近の航空写真である。やはりほぼ等間隔で並んだ水路群が見られるがこちらの間隔は100 m程度から400 m位までの間隔となっている。これらの地形は地盤の相対的隆起にともなって侵食基準面が低下し、斜面上を流れるシー

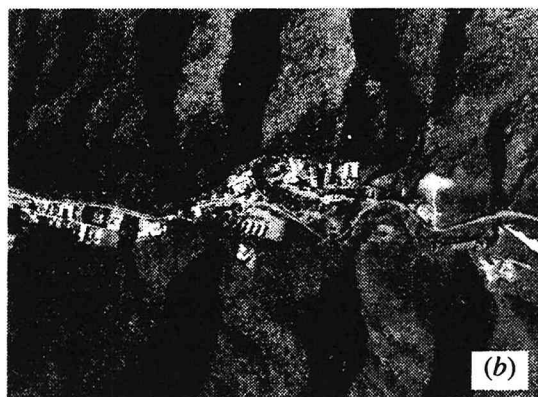


図-1 斜面上に等間隔で並ぶ水路群; (a) 米国カリフォルニア州のコーストレンジ, (b) 仙台市青葉区作並付近.

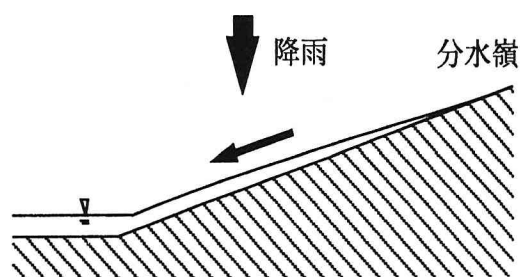


図-2 斜面上のシートフロー.

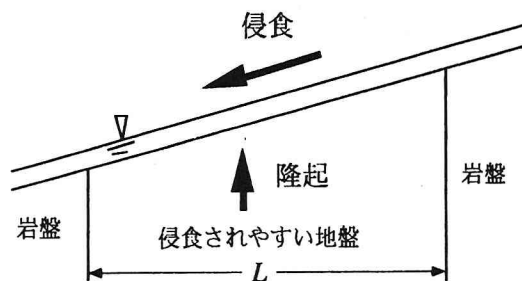


図-3 侵食による水路群形成モデル.

トフローによって斜面表面上の土砂が侵食されたり下流側へ輸送される過程で形成されたものであると推測される。図-2に斜面上のシートフローの模式図を示す。シートフローを作り出すのは斜面に降り注ぐ雨である。したがって斜面上では下流にいくにしたがって流量の増加する流れとなっている。このような流れでは厳密な意味で等流状態が実現することはあり得ない。水路形成の線形安定解析を行う場合、このことが問題を非常に複雑なものとしている。摂動を与える以前の基準状態における解が場所の関数であるとき、線形化された摂動方程式は変数係数の線形微分方程式となり、一般に解析的な解を持ち得ない。また斜面上流端では流量がゼロとなることから、摂動方程式は斜面上流端に特異点を持つことになる。このことが問題をなお一層複雑なものとしている。

本研究ではシートフローによる水路群の初期形成メカニズムに関する線形安定問題の基本特性を知ingことを第一の目的とする。そのために解析の容易な次の二つのモデルを考える。ここで考えるモデルは仮想的なものであり、前述したような現実の水路群の形成過程を厳密に再現するものではない。しかしより厳密なモデルを構築する上でも解析の容易なモデルを用いて問

題の基本的な性質を知ingことは重要なことであろう。

(2) 侵食による水路群形成モデル

図-3のような一定勾配 S を有する斜面を考える。いま流速 U 、水深 H の等流状態にあるシートフローが生じている。斜面上の長さ L の区間だけが侵食されやすい地盤であり、その上下流は侵食されにくい岩盤でできているものとする。侵食されやすい区間はシートフローの持つ底面剪断力に応じた速度で侵食されるため一定速度で低下していくことになる。いまこの低下速度と同じ速度で隆起が起こっていると仮定しよう。そのとき斜面上では隆起速度と侵食速度が釣り合った平衡状態が実現しており、斜面の勾配は一定に維持されることになる。この様な平衡状態に対して横断方向に波数 k を有する微小な擾乱を与えてみる。擾乱の成長速度は波数 k の関数となることが期待され、成長速度を最大にする卓越波長が斜面上に実際に現われる水路群の間隔であると考えられる。

(3) 土砂輸送による水路群形成モデル

図-4のような一定勾配 S を有する斜面を考える。や

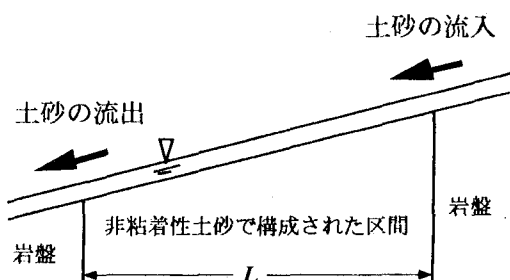


図-4 土砂輸送による水路群形成モデル。

はり流速 U 、水深 H の等流状態にあるシートフローが生じているとしよう。斜面上の長さ L の区間だけが非粘性の土砂で構成されていて、その上下流は岩盤できているものとする。非粘性土砂の区間ではシートフローの持つ掃流力に応じた掃流砂が生じており、上流から土砂の供給がなければその区間は次第に低下していくことになる。いま区間からの流出に見合った量の土砂が上流側から供給されており、斜面上の至る所でシートフローの掃流力に見合った量の掃流砂が生じていると仮定しよう。そのとき斜面上では流入土砂と流出土砂が釣り合った平衡状態が実現しており、斜面の勾配は一定に維持されることになる。前述の侵食の場合と同様に、この平衡状態に対して微小な擾乱を与えた時の卓越波長が斜面上に現われる水路群の間隔であると考えられる。

3. 侵食の理論

(1) 定式化

図-3, 4 に示したようなシートフローの運動を記述する浅水流方程式及び連続式は次の様になる。

$$\tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} = -g \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{x}} - g \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial \tilde{x}} - \frac{\tilde{\tau}_{bx}}{\rho \tilde{h}} \quad (1)$$

$$\tilde{u} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = -g \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{y}} - g \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial \tilde{y}} - \frac{\tilde{\tau}_{by}}{\rho \tilde{h}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{u} \tilde{h}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v} \tilde{h}}{\partial \tilde{y}} = 0 \quad (3)$$

ここで $\tilde{x}$ 及び $\tilde{y}$ はそれぞれ流下方向及び横断方向の座標、 $\tilde{u}$ 及び $\tilde{v}$ はそれぞれ $\tilde{x}$ 及び $\tilde{y}$ 方向の流速、 $\tilde{h}$ は水深、 $\tilde{\eta}$ は斜面上ある点の高さ、 $\tilde{\tau}_{bx}$ 及び $\tilde{\tau}_{by}$ は底面剪断力 $\tilde{\tau}_b$ のそれぞれ $\tilde{x}$ 及び $\tilde{y}$ 方向成分を表わしている。

底面剪断力及び底面剪断力ベクトルは次式で表わされるものとする。

$$(\tilde{\tau}_{bx}, \tilde{\tau}_{by}) = \tilde{\tau}_b (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)^{-1/2} (\tilde{u}, \tilde{v}), \quad (4a)$$

$$\tilde{\tau}_b = \rho C_f (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) \quad (4b)$$

ここで C_f は抵抗係数であり、簡単化のため定数とする。

水路が主として侵食によって形成される場合、斜面各点の高さの時間変化は次式で表わされる。

$$(1 - \lambda_p) \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial t} = -\tilde{E} + \tilde{\sigma} \quad (5)$$

ここで λ_p は空隙率、 $\tilde{t}$ は時間、 $\tilde{E}$ は侵食速度である。 $\tilde{\sigma}$ は隆起速度であり、ここでは等流状態での侵食速度に等しいと仮定する。侵食速度 $\tilde{E}$ は通常底面剪断力 $\tilde{\tau}$ の関数となることが知られており、ここでは次式を仮定する。

$$\tilde{E} = \alpha \tilde{\tau}^\gamma \quad (6)$$

γ の値についてはいろいろな値が報告されているが³⁾、ここではそれらの中間的な値として $3/2$ を用いる。

いま考えている区間の上下流端では地形変化はない。したがって境界条件は次のように書ける。

$$\tilde{\eta} = 0 \quad \text{at} \quad \tilde{x} = 0 \quad (7a)$$

$$\tilde{\eta} = -SL \quad \text{at} \quad \tilde{x} = L \quad (7b)$$

(2) 無次元化

次のような無次元化を導入する。

$$(\tilde{x}, \tilde{y}) = L(x, y), \quad (\tilde{u}, \tilde{v}) = U(u, v) \quad (8a, b)$$

$$\tilde{h} = Dh, \quad \tilde{\eta} = SL\eta, \quad (8c, d)$$

$$\tilde{t} = Tt, \quad T = \frac{(1 - \lambda_p)SL}{\alpha(\rho C_f U^2)^\gamma} \quad (8e, f)$$

ここで U は斜面上の等流流速、 D は等流水深である。

上記の無次元化を式(1)–(6)に適用すると支配方程式として次式が得られる。

$$F^2 \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial h}{\partial x} - \beta \left[\frac{\partial \eta}{\partial x} + (u^2 + v^2)^{1/2} u h^{-1} \right] \quad (9)$$

$$F^2 \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial h}{\partial y} - \beta \left[\frac{\partial \eta}{\partial y} + (u^2 + v^2)^{1/2} v h^{-1} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial u h}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - (u^2 + v^2)^{3/2} + 1 \quad (12)$$

ここで $F^2 = U^2/(gD)$ 、 $\beta = SL/D$ である。

無次元化された境界条件は次のようになる。

$$\eta = 0 \quad \text{at} \quad x = 0 \quad (13a)$$

$$\eta = -1 \quad \text{at} \quad x = 1 \quad (13b)$$

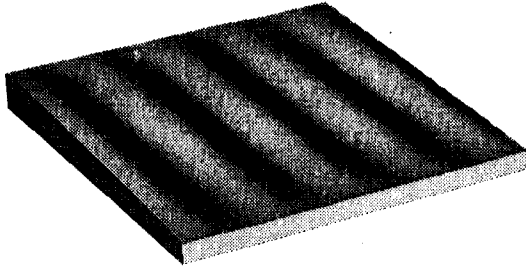


図-5 擾乱の与えられた斜面形状 ($n=1$).

(3) 線形安定解析

平衡状態では流れは等流であり、斜面形状は一様勾配の直線である。したがって次式が成り立っている。

$$u = 1, \quad v = 0, \quad h = 1, \quad \eta = -x \quad (14a, b, c, d)$$

この平衡状態に対して横断方向にサイン形状を有する微小な擾乱を与える。そのとき流速、水深、斜面形状は次のように表わされる。

$$u = 1 + au_1 \exp[i(\lambda x + \omega t) + \Omega t] \cos ky + \text{c.c.} \quad (15a)$$

$$v = av_1 \exp[i(\lambda x + \omega t) + \Omega t] \sin ky + \text{c.c.} \quad (15b)$$

$$h = 1 + ah_1 \exp[i(\lambda x + \omega t) + \Omega t] \cos ky + \text{c.c.} \quad (15c)$$

$$\eta = -x + a\eta_1 \exp[i(\lambda x + \omega t) + \Omega t] \cos ky + \text{c.c.} \quad (15d)$$

ここでc.c.は複素共役を表わす。また u_1, v_1, h_1, η_1 は複素数であり、それぞれ位相差まで含んだものとなっている。

境界条件(13)を満足するためには式(15)中の λ は次の条件を満たす必要がある。

$$\lambda = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

ここで n は流下方向のモード数を表わしており、 $n=1$ のとき流下方向の分布形状が凹形か凸形の形状を一個だけ含んでいることになる。図-5に $n=1$ のときの η の形状を模式的に示す。

式(15)を(9)-(12)に代入し、 a の一次の項だけ残すと u_1, v_1, h_1, η_1 に関する次の方程式系が得られる。

$$\begin{pmatrix} i\lambda F^2 + 2\beta & 0 & i\lambda - \beta & i\lambda\beta \\ 0 & i\lambda F^2 + \beta & -k & -k\beta \\ i\lambda & k & i\lambda & 0 \\ 3 & 0 & 0 & \Omega + i\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ h_1 \\ \eta_1 \end{pmatrix} = 0 \quad (17)$$

式(17)が0以外の自明でない解を持つための条件は次式で表わされる。

$$\begin{vmatrix} i\lambda F^2 + 2\beta & 0 & i\lambda - \beta & i\lambda\beta \\ 0 & i\lambda F^2 + \beta & -k & -k\beta \\ i\lambda & k & i\lambda & 0 \\ 2\gamma & 0 & 0 & \Omega + i\omega \end{vmatrix} = 0 \quad (18)$$

式(18)より次の様な関係が導かれる。

$$f_e(\Omega, \omega, k, \lambda, F, \beta) = 0 \quad (19)$$

これが擾乱の波数 k と発達率 Ω の間の関係式である。

4. 土砂輸送の理論

(1) 定式化

流れの方程式及び境界条件は侵食の理論と同一である。

斜面表面が非粘着性の材料で構成されている場合、地表面高さの変化は土砂輸送の機構によって生じる。斜面各点の高さの時間変化は次式で表わされる。

$$(1 - \lambda_p) \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial t} = - \left(\frac{\partial \tilde{q}_{bx}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{q}_{by}}{\partial \tilde{y}} \right) \quad (20)$$

ここで $(\tilde{q}_{bx}, \tilde{q}_{by})$ は掃流砂量ベクトルであり Meyer-Peter & Müller 公式を用いて次式で表わされるものとする。

$$(\tilde{q}_{bx}, \tilde{q}_{by}) = \tilde{q}_b (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)^{-1/2} (\tilde{u}, \tilde{v}), \quad (21a)$$

$$\tilde{q}_b = 8 (\tau^* - \tau_{cr}^*)^{3/2} (R_s g D_s^3)^{1/2} \quad (21b)$$

ここで τ_{cr}^* は限界掃流力であるが、ここでは問題を簡単にするために底面剪断力は限界掃流力よりも遥かに大きいものとみなして $\tau_{cr}^* = 0$ とする。

(2) 無次元化

代表時間 T を次のように置き直す。

$$T = \frac{(1 - \lambda_p) S L^2 R_s g}{8 C_f^{3/2} U^3} \quad (22)$$

そのとき式(20)及び(21)を無次元化すると次式が得られる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \left[\frac{\partial (u^2 + v^2) u}{\partial x} + \frac{\partial (u^2 + v^2) v}{\partial y} \right] \quad (23)$$

(3) 線形安定解析

式(15)を(9)-(11)及び(23)に代入し、 a の一次のオーダーの項だけ残すと u_1, v_1, h_1, η_1 に関する次の方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} i\lambda F^2 + 2\beta & 0 & i\lambda - \beta & i\lambda\beta \\ 0 & i\lambda F^2 + \beta & -k & -k\beta \\ i\lambda & k & i\lambda & 0 \\ 3i\lambda & k & 0 & \Omega + i\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ h_1 \\ \eta_1 \end{pmatrix} = 0 \quad (24)$$

式(24)が0以外の自明でない解を持つための条件は次式で表わされる。

$$\begin{vmatrix} i\lambda F^2 + 2\beta & 0 & i\lambda - \beta & i\lambda\beta \\ 0 & i\lambda F^2 + \beta & -k & -k\beta \\ i\lambda & k & i\lambda & 0 \\ 3i\lambda & k & 0 & \Omega + i\omega \end{vmatrix} = 0 \quad (25)$$

式(25)より次の様な関係が導かれる。

$$f_t(\Omega, \omega, k, \lambda, F, \beta) = 0 \quad (26)$$

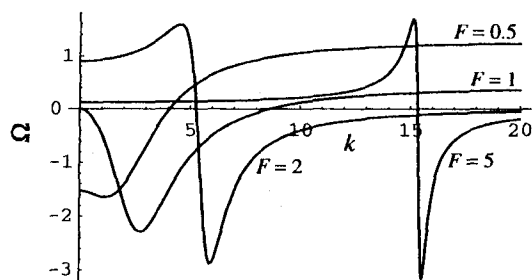


図-6 侵食によって水路群が形成される場合の k 及び F による Ω の変化 ($n=1, \beta=1$).

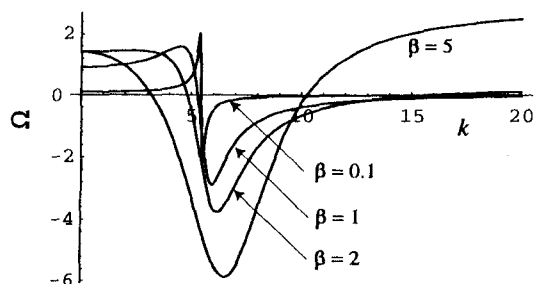


図-7 侵食によって水路群が形成される場合の k 及び β による Ω の変化 ($n=1, F=2$).

これが擾乱の波数 k と発達率 Ω の関係式である。

5. 考察

(1) 侵食によって形成される水路群の初期形成間隔

図-1を見てもわかるように実際に見られる擾乱は最も低次のモード($n=1$)である。そこでまず $n=1$ として式(19)の特性を調べてみる。図-6は $\beta=1$ として k 及び F による Ω の変化を調べたものである。 F が1より小さいとき Ω はピークを持たず卓越波長(Ω が最大となる波長)を有しないが、 $F=2$ のとき $k=4.5$ で、 $F=5$ のとき $k=15$ 付近でピークをとることがわかる。波長 ℓ と波数 k の関係は次式で表わされるから、

$$\ell = \frac{2\pi L}{k} \quad (27)$$

$F=2$ のとき斜面長の1.4倍、 $F=5$ のとき0.42倍の間隔で水路が形成されることになる。また F が大きくなればなるほど水路間隔は小さくなるのがわかる。

図-7は $n=1, F=2$ としたときの k 及び β による Ω の変化を示したものである。 β が0.1, 1のとき Ω は $k=5$ 前後でピークをとるが、 β が大きくなると次第にピークを持たなくなることがわかる。実は式(9)及び(10)において $\beta=\infty$ の極限をとることは移流慣性項(左辺及び右辺第一項)を無視した等流近似を行うことに他ならない。このことから等流近似のモデルが有限な水路間隔を予測できないことがわかる。

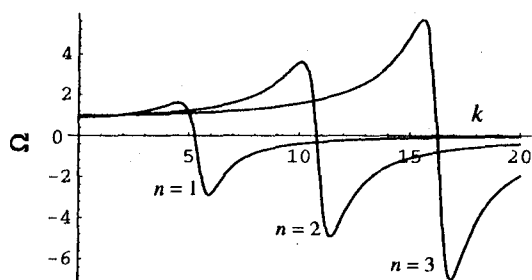


図-8 侵食によって水路群が形成される場合の k 及び n による Ω の変化 ($F=2, \beta=1$).

図-8は $F=2, \beta=1$ としたときの k 及び n による Ω の変化を示したものである。 n が増加するにつれて卓越波数とそのときの Ω の値が増加していく様子がわかる。この結果は最低次のモード($n=1$)よりもより高次のモードの方が大きな発達率を有しており、より高次のモードはより大きな卓越波数を有していることを意味している。すなわち擾乱の発達率だけで議論すると、より小さな波長を有する高次モードの擾乱の方が早く発達することになる。実際の河道や谷地形には最低次のモードしか現われず、理論結果とは相反するように思われる。これは次のように解釈することが可能である。ここで得られた線形安定解析の結果はあくまで擾乱の振幅が無小である発達初期の挙動であって、ある程度時間が経過した後の擾乱の挙動はここで述べた結果と大きく変化することも十分考えられる。例えば発達初期においては高モードの擾乱の方が低モードの擾乱より大きな発達率を持つが、振幅が有限になると大小関係が逆転してしまうようなことが起これば、最終的には最低次のモードが現われることになる。実際、水路群形成の最も初期においては狭い間隔で沢山の水路群が形成されるが、時間が経過して水路が発達してくると次第に水路群の間隔が大きくなっていくことを我々は経験的に知っている。上記の結果はこのことに対応しているものと考えられる。このことを確かめるためには非線形解析を行い、有限振幅の擾乱の挙動を詳細に調べる必要がある。これは今後の課題である。

(2) 土砂輸送による水路群の初期形成間隔

土砂輸送によって形成される場合も実際に現われる擾乱は最も低次のモード($n=1$)であると考えられる。そこでまず $n=1$ として式(26)の特性を調べる。図-9は $\beta=1$ のときの k 及び F による Ω の変化である。 k が増加するときの Ω の減少分が非常に小さいのでわかりにくい、いずれのケースも有限な k の値において Ω のピークが存在する。ただし卓越波数(卓越波長)が最小(最大)となるのは $F=0.5$ 程度のときであり、それより

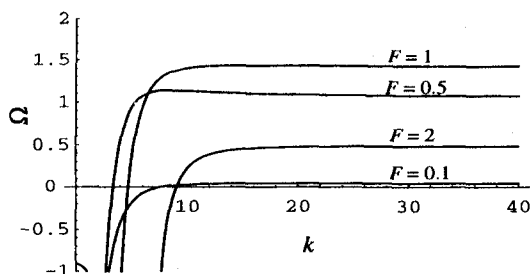


図-9 土砂輸送によって水路群が形成される場合の k 及び F による Ω の変化 ($n=1, \beta=1$).

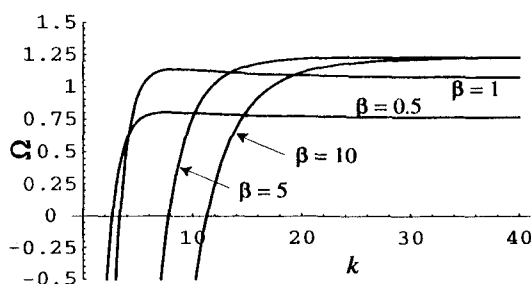


図-10 土砂輸送によって水路群が形成される場合の k 及び β による Ω の変化 ($n=1, F=0.5$).

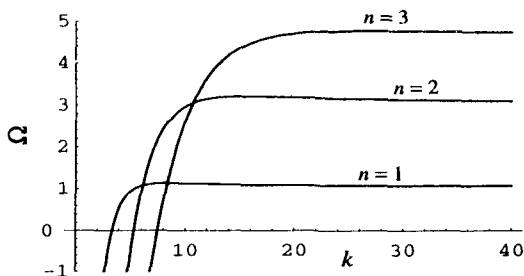


図-11 土砂輸送によって水路群が形成される場合の k 及び n による Ω の変化 ($F=0.5, \beta=1$).

小さくなくても大きくなっても卓越波数(卓越波長)は大きく(小さく)なる。すなわち $F=0.5$ 程度のとき形成される水路の間隔は最大となることがわかる。

図-10は $n=1, F=0.5$ としたときの k 及び β による Ω の変化を示したものである。 β が大きくなると卓越波数はどんどん大きくなることがわかる。侵食の場合と同様に β が大きくなることは等流近似に近づくことであつて、土砂輸送の場合も等流近似のモデルでは有限な水路間隔を予測できないことがわかる。

図-11に $F=0.5, \beta=1$ としたときの k 及び n による Ω の変化を示す。 n が増加するにつれて卓越波数とそのときの Ω の値が増加していく様子がわかる。この結果は侵食による場合とほぼ同じ傾向を示しており、侵食

による場合と同様に解釈することが可能である。

6. おわりに

本研究では解析が容易になるような仮想的なモデルに対し線形安定解析を適用することによって、水路群の初期形成間隔を予測する理論を提案した。それによって得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 侵食、土砂輸送のいずれによる水路形成の場合も実際にみられるような $n=1$ の水路は、適当な β 及び F の値に対して $k=5\sim 50$ 程度の波数で擾乱の成長率が最大となる(卓越波数)ことが明らかとなった。これは水路間隔が斜面長 L のオーダー程度になり得ることを示している。
- (2) 侵食による水路形成の場合、 $F>1$ (流れが射流)であるとき有限な卓越波長が存在し、 F が大きくなればなるほど卓越波長は小さくなることがわかった。これは F が大きくなればなるほど形成される水路間隔が小さくなることに対応している。
- (3) 土砂輸送による水路形成の場合、 F の値に(射流・常流に)よらず有限な卓越波長が存在するが、卓越波長が最大となるのは $F=0.5$ 程度のときであることがわかった。これは $F=0.5$ 程度のとき形成される水路間隔が最大となることに対応している。
- (4) 水路形成が侵食及び土砂輸送によるいずれの場合も β が大きくなる(水深に比べて斜面の高低差が大きくなる)と卓越波数は大きくなり、水路間隔は小さくなることが明らかとなった。このことは等流近似のモデルでは有限な水路間隔を予測できないことを示している。
- (5) 線形理論の範囲では、水路形成が侵食及び土砂輸送いずれの場合も高次のモードになればなるほど卓越波長は小さくなり発達率は大きくなることが明らかとなった。これは水路群形成の最も初期において間隔の狭い水路が沢山形成されることに対応していると考えられる。水路の発達にともなつて、卓越波長は最も低次のモードに移ってくるものと予想される。

参考文献

- 1) Smith, T. and Bretherton, F. B.: Stability and the conservation of mass in drainage basin evolution, *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 6, 1972.
- 2) Izumi, N. and Parker, G.: Inception of channelization and drainage basin formation: upstream-driven theory, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 283, pp. 341-363, 1995.
- 3) 吉川秀夫編著：流砂の水理学，丸善，1985.

(1997. 9. 30 受付)