

強い非平衡流砂運動を伴う河床変動 Nonequilibrium Processes in Alluvial Channels

東京工業大学工学部 正会員 福岡 捷二

東京工業大学大学院 学生会員 山坂 昌成

東京工業大学大学院 学生会員 ○安 陪 和 雄

1. 序 論

同一の水理条件（掃流力、縦・横断勾配）をもつ流れが無限の距離続いている場合には、流砂は平衡状態で流れ河床面の位置は変化しない。しかし、このような流れは特別な場合以外は起こらず、斜面上を流れる流砂は場所的な水理量の変化を受けたり流砂量を規定する境界条件の影響を受けるため一般的には非平衡状態で流れる。強い非平衡流砂運動が起こる原因とそのような斜面上の流れには次のようなものが考えられる。

(1) 水理量の場所的变化が著しいために引き起こされる非平衡流砂運動

- (a) 縦断勾配が急変する流路の流れ
- (b) 幅が急変する流路の流れ
- (c) 流量が場所的に急変する流路の流れ

(2) 流砂量を規定する境界条件のために引き起こされる非平衡流砂運動

- (a) 横断勾配が急な流路の流れ
- (b) 河床材料が場所的に変化する流路の流れ

(3) 原因(1)、(2)が重なって引き起こされる非平衡流砂運動

このような場合には、実際に流れる流砂量が平衡状態のそれと大きく異なるため、非平衡流砂量を的確に算定する必要がある。著者らは第27回水講で二次元非平衡流砂量式を提案した。¹⁾ この式はある位置を実際に流れている流砂量と本来その位置の掃流力で輸送し得る能力に相当する流砂量の間の関係を表わす。実際に流れている流砂量はこの式を適切な境界条件のもとに解くことによって求められる。

本研究の目的は、第一に、非平衡性の原因が異なると思われる二つの代表的な河床変動について実験と解析を行い、非平衡性が現れる原因と提案された非平衡流砂量式の適用性を検討する。第二に、流砂量式として非平衡流砂量式を用いる必要がある河床変動と、平衡流砂量式を用いて簡単にかつ比較的精度よく見積れる河床変動とはどのようなものであるかを明確にする。

2. 非平衡流砂量式の誘導¹⁾

非平衡流砂量式は第27回水講論文集の著者らの論文で既に誘導されているが、本解析に用いる重要な式であるためここに再記する。

最初に平衡流砂量について述べる。平衡の本来の意味は前述のように流砂の出入りが釣り合っている河床面の位置が時間的に変化しないことであり、この状態は、同一の水理条件をもつ空間が無限に広がっている場合に存在する。この状態は完全な等流でのみ生じるもので、その意味において平衡流砂量は特別な状態での流砂量であると解釈される。実際には水理量が場所的に変化する不等流が多く、このとき流砂運動は非平衡となる。非平衡の度合は不等流性の程度により異なるため、非平衡流砂量を定量化するためには、その地点の水理量で表わした規準の流砂量を定義する必要がある。そこで規準として次の量を選ぶ。考えている地点の水理量と同じ条件をもつ流れが無限に広がっていると考えた場合の仮想の流砂量、すなわち、その地点の掃流力で輸送し得る能力に相当する流砂量をその地点の平衡流砂量と定義する。このとき平衡流砂量はその地点の水理条件だけで決定されるものである。縦・横断勾配をもつ河床での平衡流砂量は、縦断方向を x 軸、

横断方向を y 軸に選ぶと、次式で表される。¹⁾

$$\frac{q_{Bex}}{(\rho_s/\rho_0-1)gd^3} = K(\tau_{*x} + \tau_{*x}') \left(\sqrt{(\tau_{*x} + \tau_{*x}')^2 + (\tau_{*y} + \tau_{*y}')^2} - \tau_{*e} \right) \quad (1)$$

$$\frac{q_{Bey}}{(\rho_s/\rho_0-1)gd^3} = K(\tau_{*y} + \tau_{*y}') \left(\sqrt{(\tau_{*x} + \tau_{*x}')^2 + (\tau_{*y} + \tau_{*y}')^2} - \tau_{*e} \right) \quad (2)$$

ここに、 q_{Bex} 、 q_{Bey} は x 方向および y 方向の平衡流砂量、 ρ_s 、 ρ_0 は砂および水の密度、 g は重力加速度、 d は砂の粒径、 τ_{*x} 、 τ_{*y} は x 方向および y 方向の無次元掃流力、 τ_{*x}' 、 τ_{*y}' は x 方向および y 方向の砂粒子に働く重力成分から生ずる付加的掃流力を無次元化したもの、 τ_{*e} は斜面上の無次元限界掃流力、 K は比例定数で 7.0 である。

次に非平衡流砂量式について述べる。砂粒子が単位距離流下する間のある方向の流砂量の変化が、これと同一方向の（平衡流砂量－非平衡流砂量）に比例すると仮定することにより次式で表される非平衡流砂量式が導かれる。

$$\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} \frac{q_{Bx}}{\sqrt{q_{Bx}^2 + q_{By}^2}} + \frac{\partial q_{Bx}}{\partial y} \frac{q_{By}}{\sqrt{q_{Bx}^2 + q_{By}^2}} = K_B (q_{Bex} - q_{Bx}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_{By}}{\partial x} \frac{q_{Bx}}{\sqrt{q_{Bx}^2 + q_{By}^2}} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \frac{q_{By}}{\sqrt{q_{Bx}^2 + q_{By}^2}} = K_B (q_{Bey} - q_{By}) \quad (4)$$

比例定数 K_B は $[1/\text{長さ}]$ の次元をもち、砂粒子の平均移動距離の逆数である。砂粒子が x 方向にのみ運動する一次元非平衡流砂運動では、(3)式は

$$\frac{dq_{Bx}}{dx} = K_B (q_{Bex} - q_{Bx}) \quad (5)$$

となる。 K_B は τ_* が 0.1 ~ 3.0、勾配 i が 0.01 ~ 0.03 の等流条件では次式で与えられる。²⁾

$$K_B = 5 \times 10^{-6} \left(\frac{\rho_0 v^2}{(\rho_s - \rho_0)g} \tau_* \right)^{-1} \quad (6)$$

3. 非平衡流砂量式の適用

(3)、(4)式あるいは(5)式を用い河床変動解析を行うには、不等流条件下での各場所の流れの掃流力を適切に見積れることが必要である。一次元的な河口砂州上の流れ、および、縦断方向に一樣で横断勾配が急な二次元的な河床上的流れでは掃流力を比較的精度よく見積れるので、これらについて河床変動解析を行い非平衡流砂量式の適用性を検討する。

(1) 河口砂州の一次元変動解析

a) 解析方法

図-1に示す二次元的な初期縦断河床（但し一樣勾配の河道が上流側へ半無限的に存在するものとする）上の流れは一次元解析が可能である。流れは常流状態で河口砂州に到達し射流状態で砂州下流側斜面を流下する。流れの掃流力 τ は断面平均流速 v の二乗に比例するものとして $\tau = \rho f v^2 / 2 \dots\dots(7)$ とおく。

摩擦係数は $f' =$

$2gn^2/h^{1/3}$ の関

係より定める。

砂州上の流れは急

変流のため限界水

深付近の水面形を

算定することはむ

ずかしく、その結

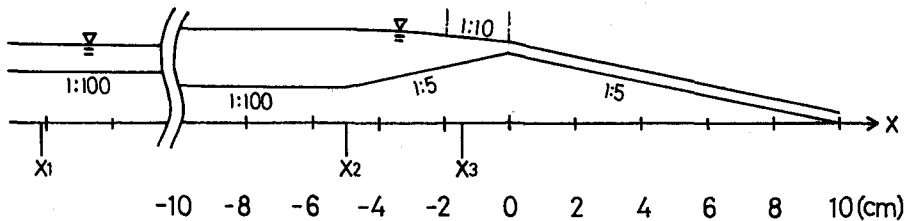


図-1 河口砂州とその上の流れ

果せん断力の評価に誤差が入る。非平衡流砂量式の検討には、水面形を精度よく見積り、それを用いて掃流力を適切に評価することが不可欠である。そこで支配断面付近の水面形は実測値にもとづいて次のように与えることにする。砂州下流側斜面勾配は場所的にはほぼ一定のまま変化し、図-1に示すように下流側斜面上の水深は等流水深に近い。そのため砂州頂上の水深は下流側斜面上での等流水深にほぼ等しい。一方、砂州上流側斜面上の水面勾配は砂州頂上の直上流の短い区間でほぼ $1/10$ となっており支配断面はこの区間に現れている。これらの点を考慮し、解析では砂州頂上で下流側斜面勾配の等流水深を与え、頂上の直上流区間の勾配は $1/10$ とする。この区間の上下流の水面形は一次元水面形方程式で算定する。一次元流砂運動のため、平衡流砂量 q_{Bex} は(1)式で $\tau_{*y} = 0$ 、 $\tau_{*y}' = 0$ とおくことにより

$$\sqrt{(\rho_s/\rho_0 - 1)gd^3} = K(\tau_{*x} + \tau_{*y}')(\tau_{*x} + \tau_{*x}' - \tau_{*c}) \quad (8)$$

となる。非平衡流砂量式は(5)式を用いる。砂州上の流れが強い不等流であることを考慮し、 K_B として(6)式の関数形のみを用いることにする。

各地点の流砂量は次のようにして算定する。

i) 砂州による堰上げの影響のない十分上流の地点では流砂量 q_{Bx} は q_{Bex} に等しく地点 $x = x_1$ で $q_{Bx} = q_{Bex}$ である。

ii) 砂州の上流側斜面では堰上げおよび逆勾配のため掃流力が限界掃流力以下となる区間が存在し、この区間 $x_2 - x_3$ の流砂量はゼロである。

iii) 地点 x_3 より下流では掃流力が限界掃流力を再び超えるため、境界条件は $x = x_3$ で $q_{Bx} = 0$ となる。

iv) 残りの区間 $x_1 - x_2$ および x_3 より下流区間ではそれぞれの地点 x_1 および x_3 での流砂量を境界条件として用い、(5)式によって流砂量を算定する。

b) 実験方法

実験水路は、幅 0.04 m 、長さ 12 m 、勾配 $1/100$ のアクリル製開水路である。 x_1 より上流で等流状態をつくるためには、上流端から x_1 まで十分長い距離を必要とする。そのため河口砂州を水路の下流端付近につくる。各時刻の水位および河床高は水路側方よりビデオカメラにより撮影し解析することにより求めた。実験条件を表-1に示す。

c) 計算と実験の比較

図-2~4は、同一の水利条件で粒径 d が 0.22 mm 、 0.77 mm 、 1.3 mm の場合の各時刻の河床高の計算値と実測値を示す。 τ_{*c} の関数の平衡流砂量および K_B は掃流力の大きさが同一でも無次元掃流力 τ_{*c} が粒径に反比例するため上記3つの実験条件で大きく異なる。いずれの

表-1 実験条件

Run	Q	d	ρ_s
mm	cm^3/s	mm	g/cm^3
1	60	0.22	2.65
2	60	0.77	2.65
3	60	1.3	2.65

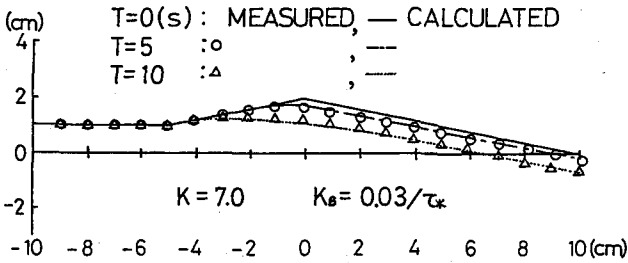


図-2 各時刻の河床高 (Run 1)

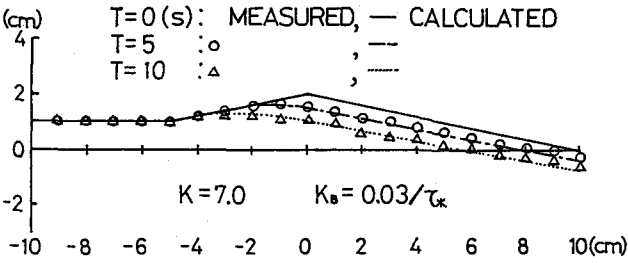


図-3 各時刻の河床高 (Run 2)

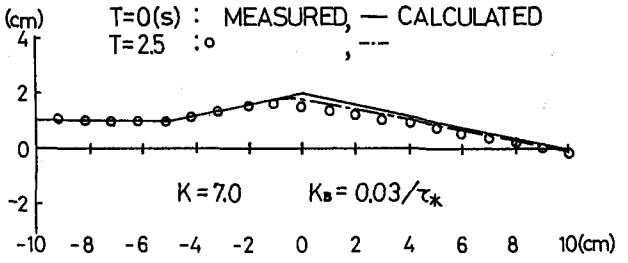


図-4 各時刻の河床高 (Run 3)

計算値も実測値をよく説明しており(5)式の適合度は高いといえる。一方、図-5は(8)式で与えられる仮定の流砂量すなわち平衡流砂量を実際に流れる流砂量として計算した各時刻の河床高を示す。この図より平衡流砂量で算定すると河口砂州の峰付近の洗掘速度が下流側斜面の洗掘速度に比べ著しく大となり実測値を説明し得ないことがわかる。この理由は、平衡流砂量では流砂の著しい非平衡性が考慮されていないため

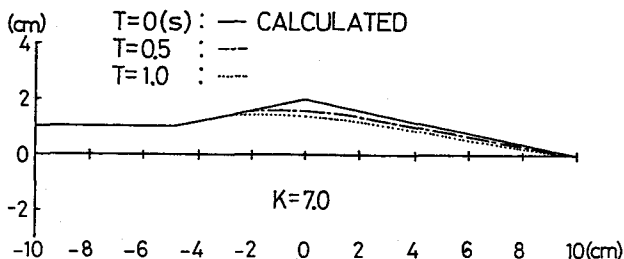


図-5 平衡流砂量で算定した各時刻の河床高 (Run 2)

である。すなわち、峰付近では、水深・勾配の場所的变化が大きいため実際には強い非平衡流砂運動が起こっているにもかかわらず、その地点の水理量できまる平衡流砂量を用いたためである。一方、非平衡流砂量式では流砂の非平衡性が考慮されているため、この例のような著しい河床変動でも十分説明できることになる。この実例では、平衡流砂量と非平衡流砂量の境界条件〔a)のi)とiii)〕が一致しているため、次の例で示されるように境界条件は流砂の非平衡性に影響を与えていない。

(2) 横断勾配が急な斜面の二次元変動解析

a) 解析方法

初期横断河床形状として図-6に示す二次元河床形を考える。縦断方向にはこの河床形状が十分長く続いているため流れは等流である。流れの掃流力は、 $\tau_x = \rho g h i_x \cos \theta_y$ で与えられる。ここに i_x は縦断勾配、 θ_y は横断方向の斜面角度である。平衡流砂量 q_{Bex} 、 q_{Bey} は(1)、(2)式より求める。非平衡流砂量 q_{Bx} 、 q_{By} は(3)、(4)式より求める。等流の条件から $\partial/\partial x = 0$ となり、二次流は無視しているので $\tau_{xy} = 0$ となる。 K_B はAを比例定数として前節と同様に次のようにおく。

$$K_B = A \left(\sqrt{(\tau_{*x} + \tau_{*x}')^2 + \tau_{*y}'^2} \right)^{-1} \quad (9)$$

各地点の流砂量は次のように算定する。

- i) 最大河床高地点を横断する流砂は存在しないため境界条件は、 $y=y_1$ で $q_{Bx}=q_{Bex}$ 、 $q_{By}=0$ となる。
- ii) 区間 y_1-y_2 の流砂量は地点 y_1 の境界条件と(3)、(4)式によって算定する。
- iii) 側岸を突きぬける流砂は存在しないため、境界条件は $y=y_2$ で $q_{By}=0$ である。

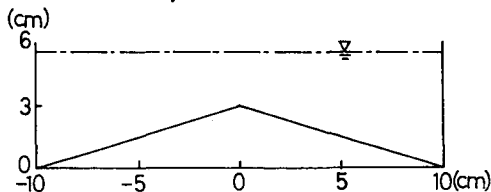


図-7 初期横断河床形状 (実験)

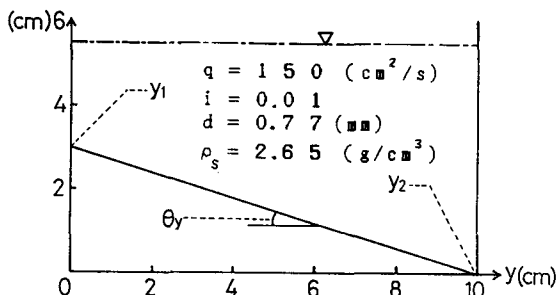


図-6 初期横断河床形状

$$K=7.0 \quad K_B=0.007/\tau_x$$

○ MEASURED
— CALCULATED

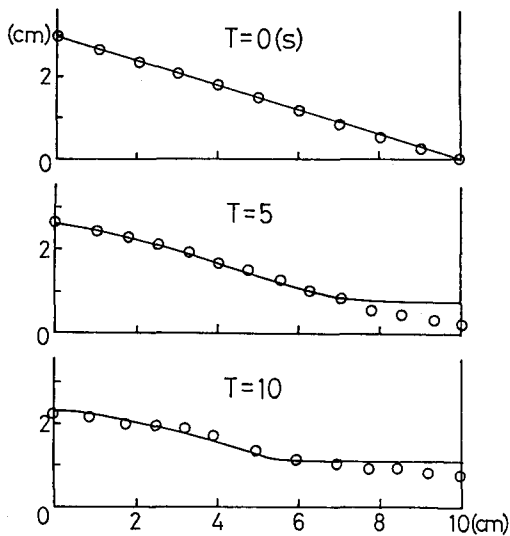


図-8 各時刻の河床高

b) 実験方法

実験水路は(1), b) に示したものと同じものを幅 0.2 m に変えて用いた。初期横断河床形状は図-7 に示すもので水路全長にわたって様な断面をもつ。対象とする実験は、流砂の洗掘堆積速度が大きいため、各時刻の河床高を素早く正確に測定する必要がある。このため光学的方法が採用された。⁴⁾ 糸を水路横断方向に張り、斜め上方から平行光線を照射する。光は水面で反射せず水中を通過するため河床面に糸の影が映る。この影の位置は河床高の変動に応じて上下流に移動する。各時刻の河床高はこの影の位置を水路上方よりビデオカメラにより撮影し解析することにより求めた。

c) 計算と実験の比較

図-8 は計算および実験によって得られた各時刻の河床高を示す。この図より計算値は実測値を比較的よく説明することがわかる。図-9 は平衡流砂量を実際に流れる流砂量と仮定して計算した各時刻の河床高を示す。この図より、平衡流砂量で河床変動量を算定すると、実測値に比べ峰部が洗掘されにくく谷部で砂が少しも堆積しないことがわかる。これは、横断方向の流砂量が実際には側岸では存在しないにもかかわらず、(2)式が示すように横断勾配がありさえすれば τ_{*y} に応じた値をもつためである。図-10 に計算で求めた平衡流砂量と非平衡流砂量を示すが、両者の値に著しい差が生じる。図-11 は、側岸を除いては実際に流れる流砂量を平衡流砂量と仮定し両側岸では流砂の境界条件 $q_{By} = 0$ を満たすようにして計算した各時刻の河床高を示す。この方法は、二次元の河床変動計算で一般に用いられる方法である。^{1), 5)} 計算値は時間の経過とともに実測値をかなりよく説明する。この理由は、側岸での境界条件を満たしているために横断勾配のゆるくなる割合が速く流砂の非平衡性も同様に速く弱まるためである。この場合の非平衡流砂運動の原因は掃流力の場所的变化よりも流砂量を規定している境界条件によると結論づけることができる。

以上のことから非平衡流砂運動を起こす原因は2つあることがわかる。河口砂州の一次元河床変動は掃流力の場所的变化によって起こされ、横断勾配が急な斜面の二次元河床変動では境界条件が原因となっている。

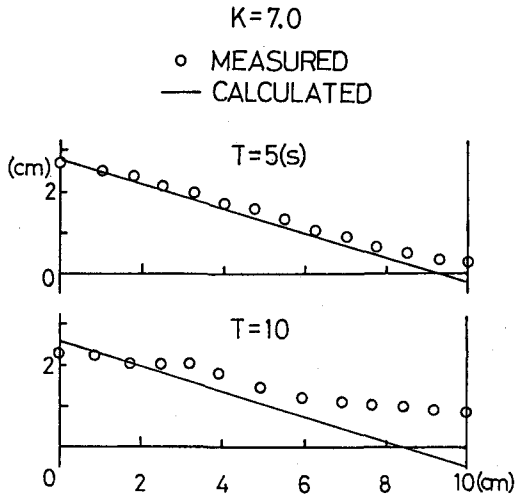


図-9 平衡流砂量で算定した各時刻の河床高

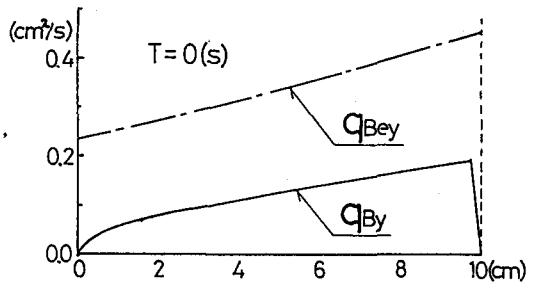


図-10 平衡流砂量と非平衡流砂量

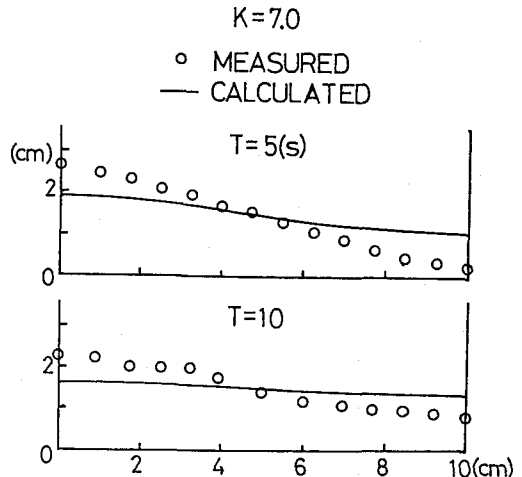


図-11 両側岸で $q_{By} = 0$ 、残りの区間で q_{By} を平衡流砂量とした場合の各時刻の河床高

4. 結 論

非平衡性の原因が異なる強い河床変動について実験と解析を行い、非平衡流砂量式および平衡流砂量式を適用した結果、次の結論が導き出された。

i) 河口砂州の一次元河床変動に非平衡流砂量式(5)式を適用すると計算値は実測された河床の変化過程をよく説明するが、平衡流砂量式では計算値は実測値を適切に説明できない。この場合の強い非平衡流砂運動の原因は掃流力の場所的变化である。

ii) 横断勾配が急な斜面の二次元河床変動に非平衡流砂量式(8)、(4)式を適用すると計算値は実測された河床の変化過程をかなりよく説明するが、平衡流砂量式を用いると計算値は実測値を説明できない。しかし流砂の境界条件(側岸で $q_{By} = 0$)を満たした上で平衡流砂量式を用いて河床変動を計算すると、時間の経過とともに実測値を説明できるようになり、平衡流砂量式のみを用いた場合より著しく改善される。この場合の強い非平衡流砂運動の原因は流砂量を規定する境界条件である。

河床変動が生じるときには必ず非平衡状態の流砂が生じている。したがって河床変動解析には非平衡流砂量式の適用が望まれる。しかし、非平衡流砂量式を用いて流砂量を算定する場合には、偏微分方程式(8)、(4)式を適切な境界条件のもとに解かなければならない煩雑さが生じる。一方、平衡流砂量式を用いる場合には、(1)、(2)式が示すようにその地点の水理量が与えられれば形式上流砂量は容易に算定できる。どのような場合に平衡流砂量式によって河床変動解析が可能かを検討しておくことは意義があろう。もし弱い非平衡流砂運動を伴う一次元河床変動であれば、平衡流砂量式を非平衡流砂量式に代用してもさしつかえないであろうし、二次元河床変動に対しては境界条件を適切に考慮すれば平衡流砂量式を非平衡流砂量式に代用してもよいであろう。

以上のことより、強い河床変動・弱い河床変動と、これに適用すべき流砂量式等との関係を表-2にまとめて示す。

表-2 河床変動と流砂量式の関係

河床変動	流砂の非平衡性が強い河床変動		流砂の非平衡性が弱い河床変動
	掃流力の場所的变化が強い非平衡流砂運動を引き起こす場合	流砂量を規定する境界条件が強い非平衡流砂運動を引き起こす場合	
流砂量式 + 境界条件	非平衡流砂量式 + 流砂の境界条件	非平衡流砂量式 + 流砂の境界条件 便法: 平衡流砂量式 + 流砂の境界条件	平衡流砂量式 + (流砂の境界条件)

謝辞 本研究を進めるにあたり、本学大学院学生五十嵐崇博君、本学学生久米正浩君の協力を得た。記して謝意を表します。

<参考文献> 1)福岡, 山坂: 直線流路の交互砂州 第27回水講, 1983 2)金, 福岡, 山坂: 流砂の非平衡性を規定するパラメータ K_B の算定 第38回水講, 1983 3)土屋, 山本: 河口部洪水時の河床変動 第27回水講, 1972 4)湯城, 早川, 石川: 狭窄部・わん曲部における砂礫堆の性状, 深掘れに関する実験 第37回水講, 1982 5)林: 河川蛇行の成因についての研究 土木学会論文報告集 第180号, 1970