

II-20

火山灰流路の側岸浸食時に現れる直線状平衡斜面の形成過程

北海道大学 正員 長谷川和義

北海道大学大学院 学生員 亀田 祐二

北海道開発局 正員 渡邊 康玄

北海道開発局 正員 金高 州吾

1.はじめに：

近年、自然を残した親水性のある河川環境を求める声が日増しに高まっている。このため、河岸浸食をコンクリート製護岸で防止するという従来の方式に代わる河道維持の方法を検討することが急務になった。福岡ら^{1) 2)}は、高水数および河岸の植生、とりわけオギとヨシの河岸浸食の防御効果を現地観測と実験から明らかにするとともに、ベーン工の河岸浸食の緩和に対する効果を調べてこの問題に先鞭をつけている。一方、河岸に必然的に生ずる浸食過程に関する研究が従来より数多く行われてきた。しかし、その理論の展開には幾つもの仮定が設けられており、また従来規模の実験室実験では実スケールの現象の再現が難しく、この面での問題も多い。実際の複雑な現象を扱うには依然距離がある状況である。本研究で対象とする現象は、現実の火山灰を使用し、現実に近いスケールの実験において初めて見いだされた、動的に平衡した直線状斜面の形成過程に関するものである。このような水際付近での直線状斜面の出現は、諏訪ら³⁾による河川調査によっても報告されている。

著者ら⁴⁾は、動的平衡状態にある斜面の表層土砂を採取する事により、粗粒化がもたらす斜面勾配の調節機能について検討を加えてきた。また、比較的急勾配でしかも限界掃流力以下でも成立するような流砂量式を提案し、実験結果と良く照合することを明らかにしてきた。

本論文は、上述の重力の効果を取り入れた流砂量式を分級効果を加味して混合粒径河岸に適用し、動的平衡斜面の形成過程を再現しようとするものである。

2.動的平衡斜面の形成：

広い粒度分布の河床材料からなる大型の浸食実験を実施すると、水際付近の浸食が継続する一方それにとまって間欠的な天端の崩壊が生ずる。このとき河床部分では堆積が進行しているにもかかわらず、中間部分に動的に平衡な斜面が出現する。

この斜面の形成要因として以下のことが考えられる。一つは、流れが平均粒径に対する限界掃流力に非常に近いかそれ以下であることである。この条件は斜面傾斜角が水中安息角に近づくことを許し、しかも重力の効果によって砂粒の移動を可能にさせる。過剰な堆積または洗掘が生じた場合には、斜面傾斜角が水中安息角に近づくように自己調節するわけである。第二には、実験の規模が大型であること、河床材料が広い粒度分布からなることである。前者は、十分な分級が行われるためにはある程度長い斜面長が必要になることと関連しており、後者は、流れが平均粒径に対して限界掃流力状態にあっても、流砂が存在できる条件を提供する。これらが総合して、表層粒度分布の変化（粗粒化）を引き起こし掃流層と河床との間に砂粒の選択的な交換を生ぜしめて直線斜面の形成に寄与しているものと考えられる。

Erosion of Channel Banks Composed by Volucanic Ash and

Formation Process for Straight Equilibrium Bank in the Channel.

By Kazuyoshi Hasegawa, Yuji Kameda, Yasuharu Watanabe and Shugo Kanetaka.

3. 数値計算：

3-1. 基礎式

座標系は図-1に示す通りである。

3-1-1. 流砂の連続式

流れを等流と仮定し、流下方向には変化がないものとする、流砂の連続式は浸食時と堆積時とにそれぞれ分けて以下のように表現できる。

浸食時：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda_0} \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \quad (1)$$

堆積時：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda_a} \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \quad (2)$$

ここで、 ζ ：河床高、 λ_0 ：原河床の空隙率、 λ_a ：交換層の空隙率、 q_{By} ：横断方向流砂量である。

3-1-2. 粒径別流砂連続式

粒径別の流砂連続式は浸食時と堆積時とにそれぞれ分けて以下のように表現できる。

浸食時：

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = -\frac{1-\lambda_0}{1-\lambda_a} \frac{P_{i0}}{A} \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{1}{A(1-\lambda_0)} \frac{\partial q_{Byi}}{\partial y} \quad (3)$$

堆積時：

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = -\frac{P_{i0}}{A} \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{1}{A(1-\lambda_a)} \frac{\partial q_{Byi}}{\partial y} \quad (4)$$

ここで、 P_i ：交換層内の粒径 i の体積存在割合、 P_{i0} ：原河床の粒径 i の体積存在割合、 q_{Byi} ：粒径 i の横断方向流砂量、 A ：交換層厚（ここでは、最大粒径程度とする）である。

3-1-3. 掃流力及び限界掃流力の算定

粒径 i にかかる掃流力は水深比例の斜面方向成分を用いて算定した。また、限界掃流力は岩垣式と Egiazaroff 式を用い、さらに斜面上の限界掃流力は Lane-Carlson の式を用いて決定した。

3-1-4. 浸食砂量式

従来の浸食砂量式は、斜面傾斜角が非常に緩くて重力の効果を無視できるものとしてきた。それに対し、著者らは、Parkerら⁵⁾にならい重力項を省略せずに浸食量式を導いた。すなわち、砂粒に働く力の釣合式から砂粒の移動方向角および移動速度を解析的に繰り返し計算により求め、せん断力と掃流砂抵抗に関する Bagnold の条件を重力効果を加味して拡張することにより、流砂量を限界掃流力以下の流れにおいても計算できるようにした。しかも、実験値との適合性もかなり良いことが確認できた。これらを書き下すと以下のようになる。

$$\tan \gamma_i = \frac{\tan \theta}{\mu_k} \left(\frac{1}{\cos \gamma_i} - \frac{u_{gi}}{u_d} \right) \quad (5)$$

$$\frac{u_{gi}}{u_d} = \cos \gamma_i - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \frac{\mu_k}{\mu_s} \cos \gamma_i \cos \theta \left\{ 1 + \left(\frac{\tan \theta}{\mu_k \cos \gamma_i} - \tan \gamma_i \right)^2 - 1 \cos^2 \gamma_i \right\}} \quad (6)$$

$$q_{Byi} = \frac{\psi}{\mu_k \cos \theta} \frac{\sqrt{\tau_{*i}}}{\sqrt{1 - (\tan \theta / \mu_k)^2}} (\tau_{*i} - \tau_{*cs}) \frac{u_{gi}}{u_d} P_i \sin \gamma_i \quad (7)$$

ここで、 γ_i ：流下方向に対して移動する粒径 i の偏角、 μ_s 、 μ_k ：それぞれクーロン静止および動摩擦係数、 θ ：斜面傾斜角、 u_{gi} ：粒径 i の移動速度、 u_d ：砂粒に働く流れの速度、 τ_{*i} ：粒径 i の無次元掃流力、

τ_{*ci} : 粒径 i の無次元限界掃流力、 τ_{*ci} : 粒径 i の斜面上の無次元限界掃流力、 P_i : 掃流層内での粒径 i の体積存在割合、 ϕ : 流速係数（ここでは8.5とする）である。

しかし、実際にシミュレーションを行う際に繰り返し計算に要する時間がかかり、通水時間の長い実験を再現することはかなり困難である。そこで、式(5)の代わりに、ここでは従来用いられてきた緩勾配斜面で成り立つ砂粒の移動方向偏角を表す式(8)を適用することとした。

$$\tan \gamma_i = \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_k}} \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}} \tan \theta \tag{8}$$

図-2は、式(5)、(6)から求めた砂粒の流下方向に対する移動偏角と、式(8)から得られたものとを斜面傾斜角毎に比較した図である。図中の実線は前者を示し、●、▲印は後者を示している。この図から、項の省略を行った場合にも緩勾配斜面については後者とよく一致することがわかる。しかし、斜面勾配が次第に大きくなり、重力の影響が強くなってくると両者は一致しなくなることがわかる。

図-3は、式(5)と(6)または式(8)からそれぞれ求めた $\tan \gamma$ から、式(5)を用いて砂粒の移動速度を求め、式(7)よりそれぞれ斜面傾斜角別に流砂量を求めたものである。図中

の実線および●、▲印は図-2に従うものとする。この図から斜面傾斜角別にみた流砂量は、両者ともによく一致していることがわかる。つまり、 $\tan \gamma$ が急斜面で両者が一致しなくても、重力効果が加味された式(7)では流砂量はよく一致することがわかる。よって、砂粒の移動偏角を求めるにあたっては式(8)を用いることとする。

3-2. 計算の概要および条件

本論文で行った計算は、1992年に著者らが行った三つの実験を対象としている。計算方法は保存則差分法であるマッコーマック法を用いた。計算メッシュは0.2m、計算時間間隔を0.05秒としているが計算上の不安定を解消するため、人工粘性項を加えた。流路の条件、水理諸量は表-1に示す通りである。河床材料は、実験に用いた粒度分布をもとに、表-2に示す通りそれぞれ6粒径に分割した。

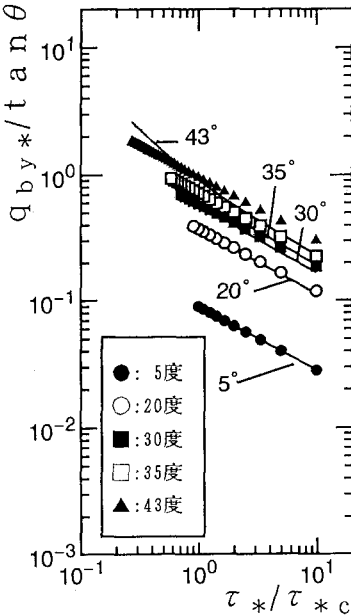


図-2 砂粒の移動方向偏角

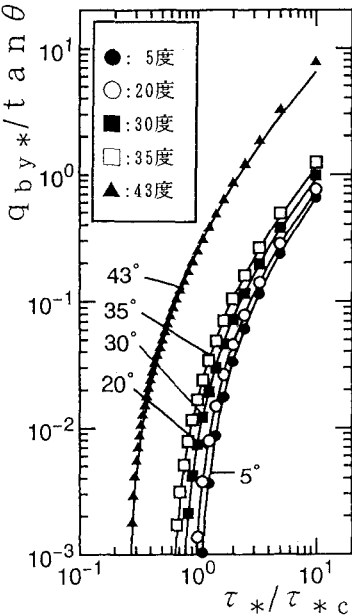


図-3 流砂量

	RUN. 1	RUN. 2	RUN. 3
河床勾配	1/1500	1/500	1/1500
流量(m)	1m³/s	1m³/s	1m³/s
天端高(m)	0.1m	0.1m	0.1m

表-1 流路条件・水理諸量

粒径(mm)	RUN. 1	RUN. 2	RUN. 3
0.074	.365	.335	.419
0.420	.187	.147	.180
2.000	.184	.165	.143
4.760	.059	.092	.043
75.000	.150	.168	.183
100.000	.055	.093	.032

表-2 計算上の粒径・存在確率

3-3. 計算結果

3-3-1. 流路横断面形状の時間変化

図-4、5はそれぞれ実験時に動的平衡斜面が出現したrun.1とrun.3に対する流路横断面形状の時間変化を描いたもので実験値と計算値とを比較して示している。これらの図から、それぞれ通水開始後50分後の横断面形状が実験値とよく一致しているものの、それ以降、計算による拡幅量が実験値と比べて極端に小さくなっていることがわかる。しかし、斜面中央には直線状斜面が出現している。

図-6は、run.2に対する実験および計算による流路横断面形状の時間変化を示したものである。この図から上述のrun.1とrun.3と同様、計算値拡幅量は実験値よりも極端に小さいことがわかる。しかし、計算上の横断面形状は、実験値と同様に曲線状を示していることがわかる。

3-3-2. 横断方向の平均粒径の時間変化

図-7、8、9は、それぞれrun.1、2、3における計算表層平均粒径の時間変化を横断位置ごとに示したものである。図-7、9から、両者ともに平均粒径の横断方向分布およびその時間変化がともに同様の傾向を示し、斜面部分の粗粒化や河床の細粒化の傾向も一致していることがわかる。

図-8においても、斜面で粗粒化が生じ河床で細粒化が起こっているが、その傾向は顕著ではなく、むしろ河床から斜面にかけてアーマコートを形成する結果になっている。

3-3-3. 横断方向の粒度分布の時間変化

図-10、11、12はそれぞれ、run.1の水際部分、斜面部分および河床部分の粒度分布の時間変化を示したものである。図-10から、計算値は実験値同様、時間の経過にともなう粗粒化傾向を示している。計算では細粒径砂の“洗い出し”現象を表現しているが、大きい粒径のものは動けずその場にとどまっていることがわかる。図-11に示されるように斜面部分では、実験値と計算値がよく一致している。また、1mm程度の粒径の抜け出しが大きく、中膨らみの粒度分布形状になっている。このことも、動的平衡斜面の特徴である。図-12の計算結果では時間の経過とともに細かい粒径のものが増加しており水際で流掃された細かい土砂が河床まで移動していることがわかる。しかし、実験値のように一度粗粒化を起こしながら次第に細くなっていく過程を

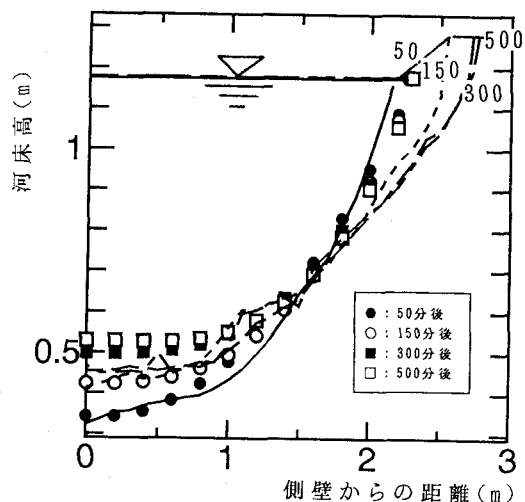


図-4 流路横断面形状の時間変化(RUN.1)

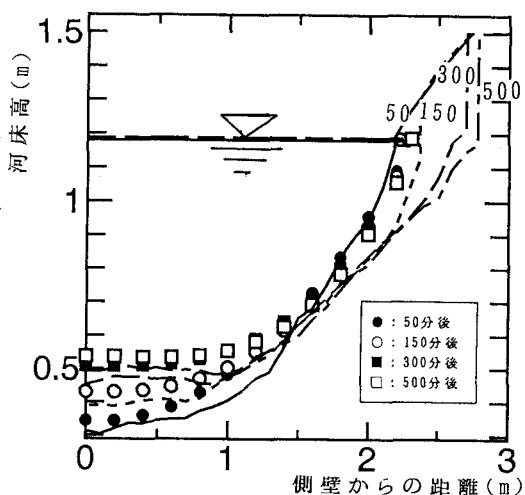


図-5 流路横断面形状の時間変化(RUN.3)

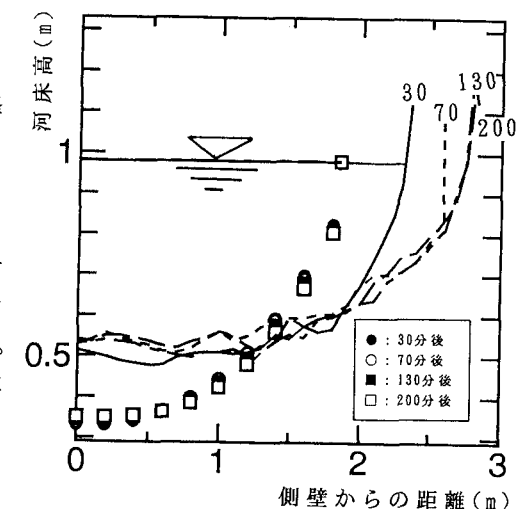


図-6 流路横断面形状の時間変化(RUN.2)

表現しきれていない。

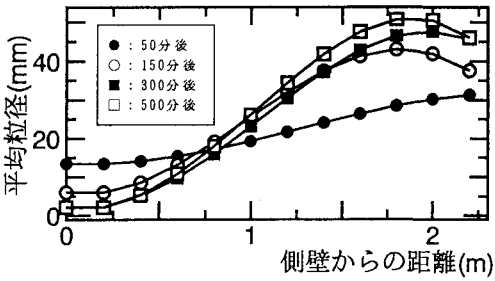


図-7 平均粒径の変化(RUN. 1)

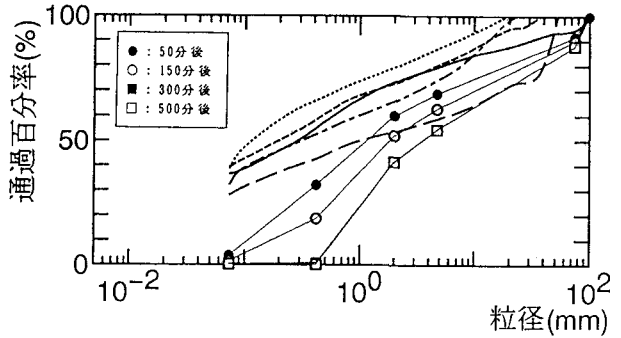


図-10 水際の粒度分布の時間変化

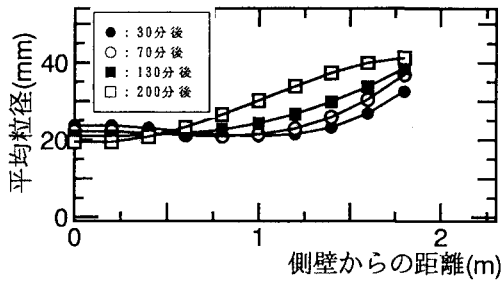


図-8 平均粒径の変化(RUN. 2)

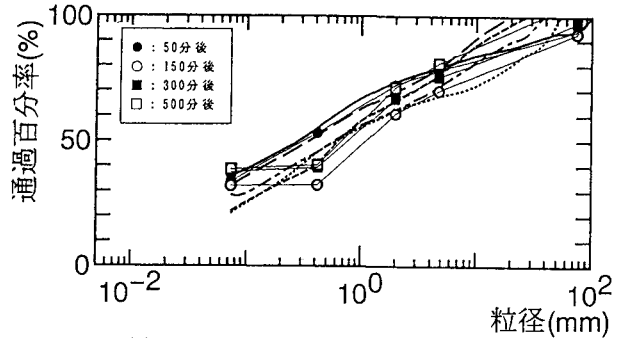


図-11 斜面の粒度分布の時間変化

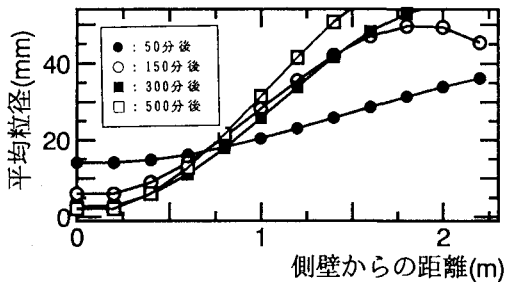


図-9 平均粒径の変化(RUN. 3)

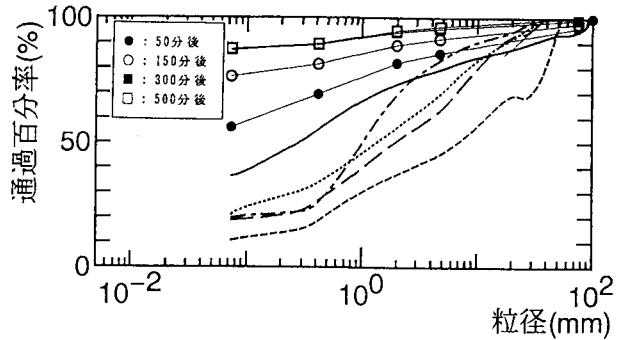


図-12 河床の粒度分布の時間変化

4. 結論:

混合粒径モデルに重力の効果を加味した浸食砂量式を適用して動的平衡斜面の出現を数値計算によって再現しようと試みた。その結果、河床勾配が小さいrun.1とrun.2においては直線斜面の形成が再現された。また、河床勾配が大きいrun.2については曲線状を呈する河床を再現している。しかし、初期を除き流路横断面形状の時間変化を実験値と一致させることができず、しかも極端に拡幅量が小さかった。以上のように本計算は、河床形状をはある程度定性的に説明づけたものといえる。同時に計算の上で流路拡幅や斜面の浸食作用と河床表層の粒度構成との密接な関係を表現できたものと考ええる。なぜなら、河床が粗粒化を起こすと平均粒径に対する掃流力が小さくなり、それよりも大きい粒子にかかる無次元掃流力が小さくなって動きにくくなるからである。拡幅の不一致を改善するためには、粗粒化が生じた場合の遮蔽係数の評価を正確にすることが重要であり、そのために直線状斜面内部の流砂機構を解明する必要がある。また、天端の崩壊土砂の埋め戻しに関する考察も不可欠であろう。

参考文献

- 1) 福岡捷二・新井田浩・佐藤健二：オギの河岸侵食抑制と耐力の評価，水工学論文集第36巻，1992.
- 2) 福岡捷二・渡辺明英・萱場祐一・曾田英揮：ベン工を用いた多様な川底の創造と魚への配慮，水工学論文集第36巻，1992.
- 3) 諏訪義雄・山本晃一：河岸侵食に関する現地調査，水工学論文集第35巻，pp. 263-268, 1991.
- 4) 竹本・渡邊・長谷川・亀田：火山灰流路の側岸侵食過程に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集第48号，pp. 445-448, 1992.
- 5) Kovacs, A. and G. Parker : Time development of straight self-formed river channels in non-cohesive material. Part. 1, General vectorial model for bedload transport on arbitrarily sloping beds., JFM 投稿中
- 6) 亀田・長谷川・渡邊・金高：広い粒度分布をもつ河岸に対する側岸侵食砂量式に関する研究，水工学論文集第37巻，投稿中
- 7) 金高・渡邊・長谷川・亀田：大型の火山灰流路を用いた側岸侵食実験，水工学論文集第37巻，投稿中
- 8) 池田駿介・G. Parker・千代田将明・木村善孝：直線砂礫河川の動的安定横断形状とそのスケール，土木学会論文報告集第375号，pp. 117-127, 1986.
- 9) 平野宗男：拡幅を伴う流路幅変化について，土木学会論文報告集第210号，pp. 13-20, 1973.
- 10) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究，土木学会論文報告集第316号，pp. 37-50, 1981.
- 11) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する研究，土木学会論文報告集第206号，pp. 59-69, 1972.