

勾配急減点近傍における土石流の堆積過程に関する実験とその解析

STUDY ON DEBRIS FLOW BEHAVIOR IN A REGION AROUND A POINT OF ABRUPT SLOPE REDUCING

高濱淳一郎¹・藤田裕一郎²・蜂谷圭³・坂本麻矢⁴

Jun-ichiro TAKAHAMA, Yuichiro FUJITA, Kei HACHIYA and Maya SAKAMOTO

¹正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³学生員 岐阜大学大学院 工学部工学研究科土木工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

⁴非会員 株式会社大增コンサルタンツ (〒454-0828愛知県名古屋市中川区小本二丁目14番5号)

Deposition process of debris flow has not been examined in detail in a region around a point of abrupt slope reducing though the process is very important for disaster prevention planning. Several experiments were carried out to investigate the process by measuring profiles of free surface, interface if it appears and bed and by tracing sand particle locus. The experimental results were compared with those of computation of a two-layer model proposed by the authors to show good agreement in case of movable bed surface condition in upstream reach and some discrepancy with fixed bed there. This discrepancy was somewhat improved by modeling the equation for equilibrium bed slope

Key Words : debris flow, valley slope changes, unsteadiness

1. はじめに

勾配急減点近傍における土石流は非定常性の高い挙動を示すことが予想されるが、不規則な溪床における土石流の流下過程を予測し、また、砂防ダムへの土石流の流入過程を考える場合、勾配急減点近傍におけるその挙動を明らかにしておかなければならない。しかしながら、このような領域における堆積過程を河床状態(固定床・移動床)の変化による違いをも含めて詳細に調べられた事例は少ない。

著者らは、勾配変化点を有する水路を用いて土石流の堆積侵食実験を実施し、提案している内部境界を考慮した一次元モデル¹⁾による計算結果と実験結果とを比較し、その適用性について検討した²⁾。これによれば、侵食堆積領域の全体的な傾向や、最終堆積形状や土砂の到達距離、および堆積に伴う水流の分離と流下については表現できている。しかしながら、堆積実験において、その初期過程で砂礫層表面が上に凸の折れ曲がり形状を呈する現象については計算によって再現されていなかった。

そこで、本研究では、このような領域における土石流

の堆積現象を詳細に調べるために、供給濃度、勾配急減点下流の勾配、および急減点の上下流水路の河床状態(固定床あるいは移動床)を変えた実験³⁾において、勾配急減点近傍における堆積面や流動層表面の時系列変化や粒子流線を読み取ってその特徴を整理した。ついで、著者らが提案した一次元モデル¹⁾による計算、ならびに土石流の侵食速度式に流れの非定常効果を導入した計算³⁾の結果と比較し、それらに基づいて急減点近傍の土石流の挙動について考察を加えた。

2. 実験条件

実験には勾配変化点を有する全長6m、幅10cmの矩形水路を用いており、 $d_{50} = 0.342$ cmの一樣砂を用い、河床にも粗度として張り付けてある。実験は表-1に示すように一定量の土砂と水を一定時間供給する方法で実施している。表中の「上流」、「下流」は勾配変化点を境にした上下流区間を意味し、上流側勾配はいずれの場合も 18° である。また、表中の「固」は固定床、「移」は飽和移動床としたことを示して、 q_m は単位幅あたりの混

合物の給砂量であり、右端の列には混合物の供給時間を示してある。

3. 勾配急減点近傍における土石流の挙動

(1) 上流区間が固定床である堆積実験

全区間が固定床であるRun1-2-2と上流区間が固定床で下流区間が飽和移動床であるRun2-2-1について、勾配急減点近傍における河床面、砂礫移動層と水流層との境界面であるinterface、及び、最上層の自由表面の変化について実測結果と計算結果とを詳細に比較した結果を図-1,2に示す。図中で、○印が自由表面（free surface）位置の実測値を、△印と●印とがそれぞれinterfaceと河床（bed）の位置の実験値を示しており、一方、計算結果については破線が自由表面（free surface）、細実線が砂礫移動層と水流層とのinterface、太線が河床（bed）を表している。なお、土石流が勾配変化点に到達した時点をも $t=0\text{sec.}$ としているが、以下の比較では、各図とも下流側の初期水路底に沿って設定したx軸を横軸にしており、原点を勾配変化点にとって、下流側方向を正、上流方向を負としている。実験では、土石流のフロントが勾配変化点に到達した直後には堆積が生じておらず、堆積の初期過程において堆積区間の上流側の堆積面は下流側に比べて緩勾配となって、堆積面の河床縦断形状は上に凸の折れ曲がり形状を呈しており、この形状は時間の経過とともに遡上していくが、最終的には鈍化して消滅した。計算結果を見ると堆積区間下流端位置の移動過程や折れ曲がり頂部より下流側の堆積面変化については実測値によく合っている。しかしながら、計算による堆積面の形状は全体を通じてほぼ直線状を呈しており、初期過程において堆積遡上が過大となる傾向が見られる。実験で見られたこのような特徴は、上流区間が固定床であるケースのすべてに共通して現れていた。

図-3は、Run2-2-1の堆積の初期過程についての勾配急減点近傍における粒子の運動軌跡を示したものである。各粒子は図中の印の種類によって区別されていて、その軌跡が線で結ばれている。図中の時刻は、各粒子の追跡開始時刻である。追跡中の粒子が停止した場合はその位置を縦の矢印で示しており、矢印がついていない粒子は移動していることを示している。なお、各粒子の追跡時間ステップは同一でないため、印の位置は各粒子間の相対位置の時間的変化を示しているものではないが、追跡開始から停止までの時間は0.2秒～0.3秒である。 $t=0.0$ 秒時を始点とした粒子軌跡は、勾配急減点に到達後、下流側水路の元河床線そってほぼ平行に移動しているが、 $t=0.96\text{sec.}$ 以降では粒子は上向きに移動するようになり、その移動過程で停止する粒子が見られる。このような上向きの粒子軌跡は勾配急減点近傍での堆積面形状の傾向と一致している。このように、粒子流線には急激な曲が

りが見られるが、層流的な運動となっている。

(2) 全区間を移動床とした実験

つぎに全区間を移動床としたRun3-2-1について、Run2-2-1と同様の図を示すと図-4, 5のようである。Run3-2-1のように全区間を移動床とした場合には、勾配急減点近傍の河床縦断形状は初期過程こそかすかな折れ曲がりが見られるが、全期間を通じてほぼ直線状といえる。これらの実験結果を計算結果と比較するとinterfaceの位置は実験結果が高くなっており、この傾向は堆積の初期過程や下流勾配を 2° としたRun3-1-1において顕著であった。勾配急減点近傍の河床面の変化は、堆積の初期過程では両者が概ね一致しているが、流動層厚は実験の方が厚くなっていることによって、時間の経過とともに実験における堆積速度は計算結果よりも高くなる傾向がみられた。この理由としては実験での上流区間における初期河床土砂の侵食が計算よりも大きくなっていたことがあげられる。

実験で現れた河床やinterfaceの折れ曲り縦断形状を計算によって再現することは十分ではなかったが、この部分よりも下流側については両者は良く一致していた。しかしながら、扇頂部のような勾配急減点と急拡部を有するような地形に土石流が流入する場合には、拡幅部で側圧が開放されるために堆積面に実験で見られたような上に凸の折れ曲り形状が発生すると、拡幅部で側圧が開放されるために横断方向への土砂氾濫に大きな影響が現れるものと考えられる。

図-5のRun3-2-1の勾配急減点近傍における粒子の運動軌跡についてみると、 $t=0.0$ 秒時では上流側の初期水路底とほぼ平行に下流区間へと移動しており、下流側の初期水路床に到達した時点で停止するような粒子がいくつか見られる。粒子軌跡の勾配は時間の経過とともに小さくなっていくが、粒子はほぼ直線的にかつ層流的に移動しており、堆積面の傾向と一致している。このケースでは、粒子の追跡開始から停止までの時間は長いもので0.6秒程度であった。図-3, 5から勾配急減点近傍においても粒子は層流的な運動をしていることが確認された。

(3) 河床状態の相違による堆積過程の変化に関する考察

本実験で見られた河床やinterfaceに折れ曲がり形状が生じることは、上流区間を固定床とした堆積過程の実験初期において堆積遡上が抑えられていることによるが、その原因としては、流れが固定床区間から移動床区間への流入が第一に挙げられる。すなわち、固定床上では河床面における外力はその位置の降伏応力を上回っており、江頭らの構成則に基づく厳密解と実験結果によって確かめられているように⁴⁾、固定床上の流れの抵抗は移動床上の流れの抵抗に比べ小さくなる。つまり、実験では堆積区間よりも上流側の流れは固定床であるため、移動床である堆積区間の流れと比較して抵抗が小さく、一方、

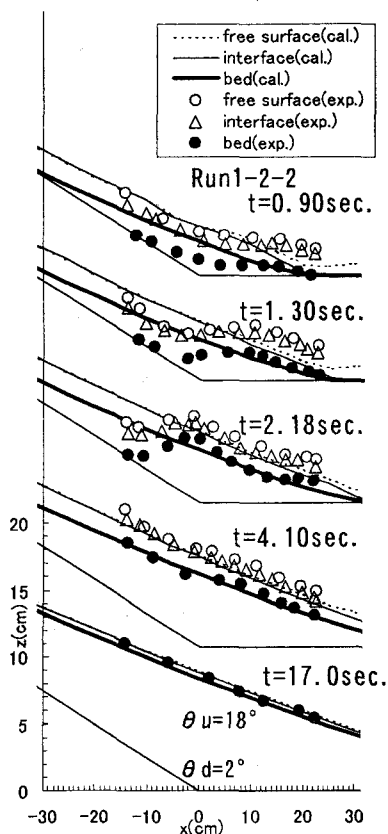


図-1 Run1-2-2の実験結果と二層流モデルによる計算結果

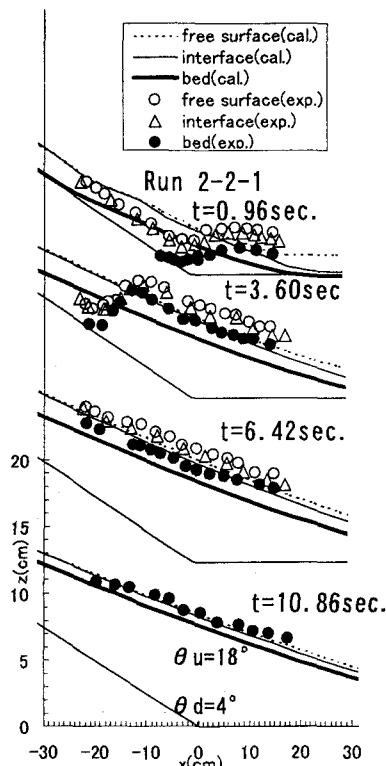


図-2 Run2-2-1の実験結果と二層流モデルによる計算結果

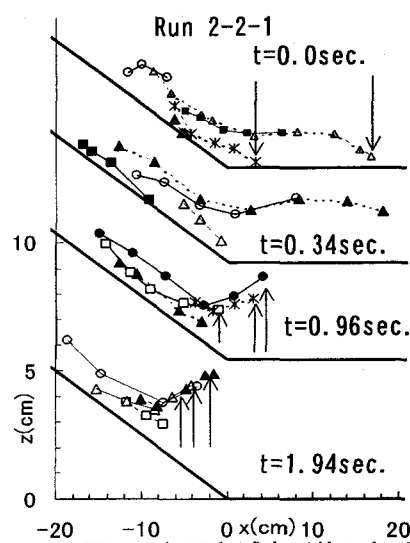


図-3 勾配急減点近傍における粒子の層流的運動 (Run2-2-1) (図中の時刻から各粒子軌跡を追跡し、粒子が停止した場合はその位置を縦矢印で示す)

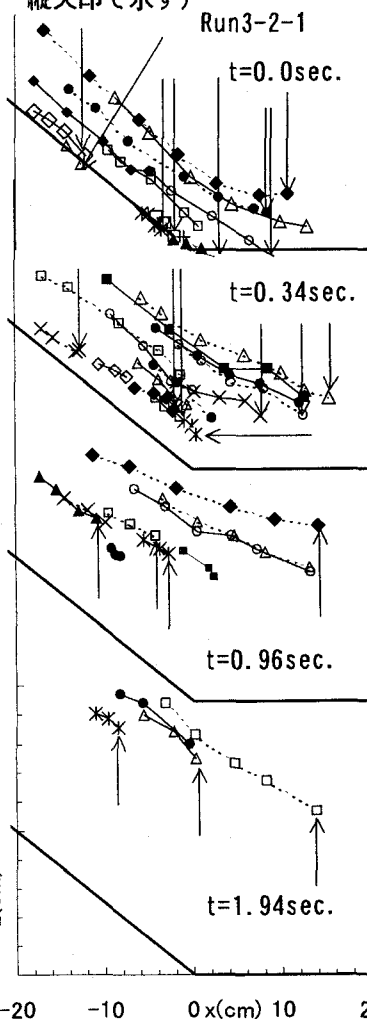


図-5 勾配急減点近傍における粒子の層流的運動 (Run3-2-1) (図中の時刻から各粒子軌跡を追跡し、粒子が停止した場合はその位置を縦矢印で示す)

表-1 実験条件

Run No.	上流状態	下流状態	勾配	qm (cm ² /s)	c	T (sec)
1-1-1	固	固	2°	128.9	0.304	5.30
1-1-2	固	固	2°	135.2	0.346	6.02
1-1-3	固	固	2°	136.2	0.407	6.15
1-2-1	固	固	4°	128.0	0.306	5.90
1-2-2	固	固	4°	127.3	0.349	10.9
1-2-3	固	固	4°	139.7	0.397	11.4
1-3-1	固	固	8°	117.9	0.300	10.9
1-3-2	固	固	8°	126.8	0.350	5.68
1-3-3	固	固	8°	137.2	0.405	6.68
2-1-1	固	移	2°	125.8	0.300	10.5
2-1-2	固	移	2°	127.7	0.403	10.4
2-2-1	固	移	4°	122.6	0.302	10.9
2-2-2	固	移	4°	139.3	0.392	11.2
3-1-1	移	移	2°	133.9	0.303	10.3
3-2-1	移	移	4°	128.8	0.300	10.7

(上流側河床勾配は18°)

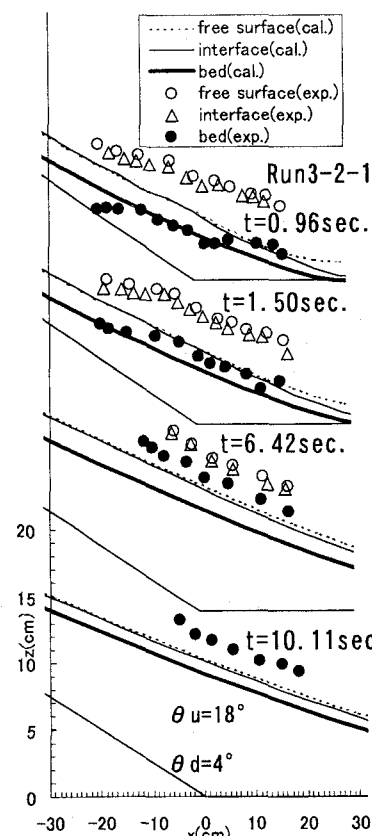


図-4 Run3-2-1の実験結果と二層流モデルによる計算結果

急勾配であるため外力が大きくなっているため、流れの持つ慣性力により、堆積区間の河床を移動状態へと加速するという効果が強く現れたためと考えられる。実際、本実験で現れた河床面や砂礫移動層表面の折れ曲がり形状は、固定床区間における土石流の濃度が低いほど、すなわち外力に対する降伏応力の割合が小さいほどその規模が大きくなり、またその形状が継続する時間も長くなっている。つまり、この折れ曲がり形状は上流固定床区間での流速が下流の緩勾配移動床上で堆積に至るまでに減速する区間に対応しているものと考えられる。したがって、上流区間において移動床が形成されているRun3-1-1,2で、このような減速に要する流下距離やその時間は短くなることとなり、その結果、顕著な折れ曲がり形状が現れなかったものと考えられる。また、Run3-1-1,2では、途中から上流側区間の一部が固定床となつて、外力が降伏応力を上回る状態となり、その状態で移動床区間に流入していた。その結果、移動床上の流れに比べて高速で流下するため、大きな慣性力が働くことで侵食速度が計算値よりも大きくなったのではないかと考えられる。実験において顕著に現れたこのような河床状態の違いや非定常性に基づく流れの挙動を流動層で積分した支配方程式で正確に取り扱うことは難しいものと考えられるが、この点については既に若干の考察³⁾を行っている。次章ではそれについて実験値と比較検討する。

4. 堆積侵食速度に流れの非定常性を導入した解析と実験値との比較

本研究で取り扱っている領域では流れの非定常性が強く現れているものと考えられる。本研究では、江頭らによる土石流の侵食速度式³⁾を二層流に拡張して用いている¹⁾が、この侵食速度式は平衡状態から大きく外れていない状態を対象としているので、非平衡性の高い場へ適用するために、侵食速度式に流れの非定常効果を導入した計算³⁾を行った。ここでは、それと比較して考察する。

本研究の解析で用いている江頭らの構成則⁸⁾から、せん断応力が降伏（限界）応力を超える場合にはせん断変形が生じるため、shear flowあるいは侵食が生じ、下回る場合にはせん断変形を起こさないため、plug flowや堆積が生じる。したがって、運動方程式中の河床面せん断応力が降伏限界応力を上回れば侵食し、下回れば堆積が生じると考えることができる。従来の堆積侵食の判断は外力と降伏応力との大小関係でなされることが多い。これを運動方程式に基づいて解釈すると、圧力勾配項と慣性項を省略した運動方程式を用いて、外力と河床面せん断応力が釣り合うとして、河床面せん断応力を評価し、この河床面せん断応力と降伏限界応力との大小関係を用いて侵食堆積を判断していると考えられる。そこで、圧力項や慣性項が導入された運動方程式を用いて、河床面せん断応力を評価し、この河床面せん断応力と降

伏限界応力との大小関係で侵食堆積を判断し、侵食堆積速度の絶対値を評価することを試みる。ここでは、江頭らの侵食堆積速度式を対象として、圧力項や慣性項を導入する。具体的には、先に述べた江頭らの侵食速度式で中心的役割を果たしている平衡勾配を定義する河床面における外力と降伏応力との力の釣り合い式に、運動方程式の非定常項である圧力項や慣性項を導入した平衡勾配を用いて解析を行い、考察を加える。

まず、本モデルによる二層の運動方程式を足し合わせて全層に対する運動方程式とすると次式のようになる。

$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w v_w^2 h_w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s v_s^2 h_s)}{\partial x} \quad (1)$$

$$= \rho_w g h_w \sin \theta + \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \frac{\partial P_s}{\partial x} - \tau_b$$

ここに、 ρ_w は水流層の密度、 ρ_s は砂礫層の平均密度、 h_w は水流層厚、 h_s は砂礫移動層厚、 v_w は水流層の平均流速、 v_s は砂礫移動層の平均流速、 g は重力加速度、 θ は河床勾配、 P_w は水流層に作用する全圧力、 P_s は砂礫層に作用する全圧力、 τ_b は河床面せん断応力である。

本モデルにおける侵食速度 s_T は江頭らの侵食速度式⁵⁾を二層流に拡張して次式のように評価している。

$$s_T = v_t \tan(\theta - \theta_c) \quad (2)$$

ここに v_t は二層流全体の平均流速、 θ_c は全層平均濃度 c_t に対応する平衡勾配であり、江頭らの構成則⁸⁾に基づいた次式に示す河床面における外力と降伏応力との力の釣り合い式から導かれている。なお、以下の議論のため、この場合の平衡勾配を θ_{e0} と表す。

$$\{(\sigma - \rho)c_t + \rho\}gh_t \sin \theta_{e0} - (\sigma - \rho)c_t gh_t \cos \theta_{e0} \tan \phi = 0 \quad (3)$$

ここに、 σ は砂礫密度、 ρ は水の密度、 h_t は全流動層厚、 ϕ は砂礫の内部摩擦角である。

そこでまず、運動方程式の圧力項を付加し、このときの平衡勾配を θ_{ep} として、圧力に含まれる勾配の項をくり出せば、次式のようになる。

$$\{(\sigma - \rho)c_t + \rho\}gh_t \sin \theta_{ep} - \cos \theta_{ep} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x} - (\sigma - \rho)c_t gh_t \cos \theta_{ep} \tan \phi_s = 0 \quad (4)$$

ここに、 $P_{w0} = P_w / \cos \theta_{ep}$ 、 $P_{s0} = P_s / \cos \theta_{ep}$ である。圧力勾配を考慮した平衡勾配 θ_{ep} は θ_{e0} を用いて次式のように表される。

$$\tan \theta_{ep} = \tan \theta_{e0} + \frac{\frac{1}{\rho g h_t} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x}}{\{(\sigma / \rho - 1)c_t + 1\}} \quad (5)$$

θ_{ep} は土石流フロント部のような水面勾配がある領域では、 θ_{e0} よりも小さくなり、侵食されやすい領域となり、逆の場合では侵食が抑制され、条件によっては堆積する。

土石流の侵食・堆積現象は流動層から見ればそれぞれ運動量の獲得・喪失に相当するので、侵食堆積速度に流れの非定常性を導入するためには圧力項と慣性項を導入した評価に関する検討も必要である。しかしながら、本

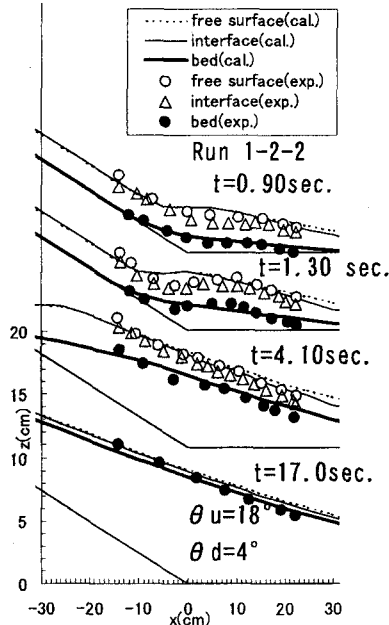
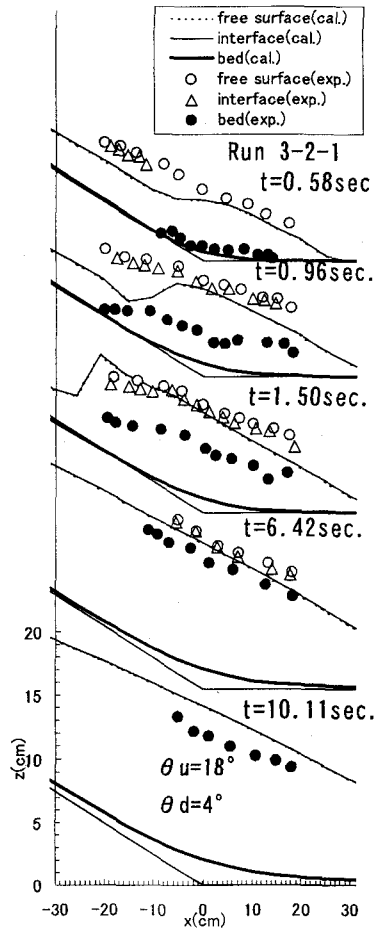
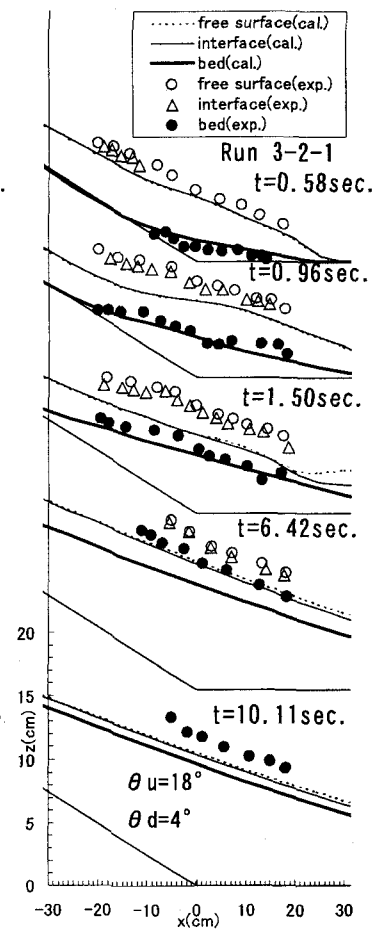


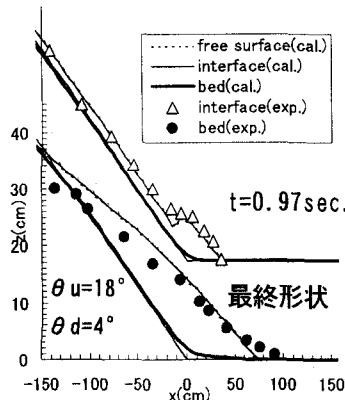
図-6 Run1-2-2の実験結果と
平衡勾配に θ_{ei} を用いた
計算結果



(a) 勾配急減点近傍

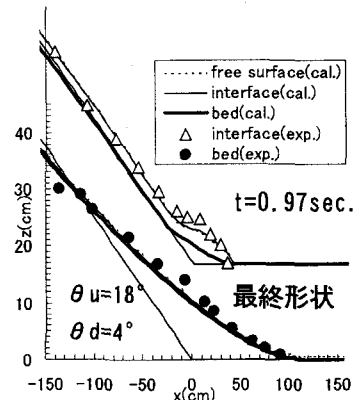


(a) 勾配急減点近傍



(b) 全体の縦断形状

図-7 Run3-2-1の実験結果と
平衡勾配に θ_{ei} を用いた計算結果



(b) 全体の縦断形状

図-8 Run3-2-1の実験結果と
平衡勾配に θ_{ep} を用いた計算結果

モデルで用いている侵食堆積速度式では直接慣性項を導入できないため、ここでは、便宜上、式(3)に運動方程式における圧力項と慣性項を付加した見かけ上の平衡勾配を導入する。この平衡勾配を θ_{ei} とすると、圧力項を考慮したときの θ_{ep} を用いて次式のように表される。

$$\theta_{ei} = \theta_{ep} + \arcsin \left\{ D / (\rho g h_i \sqrt{A}) \right\} \quad (6)$$

ここに、

$$D = \frac{\partial(\rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w v_w^2 h_w)}{\partial x} \quad (7)$$

$$A = \left\{ (\sigma / \rho - 1) c_i + 1 \right\}^2 + \left\{ (\sigma / \rho - 1) c_i \tan \phi + \frac{1}{\rho g h_i} \frac{\partial(P_{wo} + P_{so})}{\partial x} \right\}^2 \quad (8)$$

(1) 固定床実験への適用と考察

前章では上流区間が固定床である堆積実験の結果について流れの慣性力の影響が強く現れたものと解釈した。そこで、Run1-2-2を対象として平衡勾配の評価に圧力項に加えて慣性項も導入した計算の結果は図-6のように

なって、堆積の初期過程における遡上段波状の堆積形状もよく再現しており、全過程を通じて流動層表面形状の時間的変化を正しく表現していることがわかる。これは、前章で述べたように、固定床の上流区間では河床面において外力が降伏応力を上回っているため、先に述べたように緩勾配区間に流入しても慣性力の効果で河床が侵食されやすい状態が維持されて堆積区間の遡上が抑制されることが計算に反映されていることによるものと考えられる。しかし、固定床であっても供給濃度が高い実験では、次項に示すように堆積が抑制される傾向が見られた。

つぎに、圧力項のみを導入して計算すると堆積の初期にみられた堆積遡上がわずかに抑えられる程度であり、高濃度領域では流れが若干振動するような結果となって実験とは合致していない。

(2) 移動床実験への適用と考察

次に、全区間を移動床としたRun3-2-1を対象として計算結果を検討した。数値実験により、勾配 18° に対して圧力項や圧力項と慣性項を考慮した平衡勾配を用いて侵食計算を行うと、土石流先端部において高濃度領域が形成される。そこで、このような濃度上昇を解析に反映させるために、降伏応力 τ_y を江頭らによる次式⁹⁾で与えることとした。

$$\tau_y = p_s \tan \phi \quad (9)$$

$$\frac{p_s}{p_s + p_d} = \left(\frac{c}{c_*} \right)^{1/n} \quad (10)$$

ここに、 p_s は粒子による静的な圧力、 p_d は粒子衝突による圧力、 c は土石流の濃度、 c_* は停止堆積濃度、 n は実験定数($n=5$)である。なお、前項までに実施した計算では、上流側区間が固定床であるため、この区間での侵食がないため、(10)式の右辺を一定値(0.8)とした。

図-7はRun3-2-1について圧力勾配と慣性項を考慮した平衡勾配による計算結果と実験結果とを比較したものである。これらの図のように両者の自由表面の位置は比較的一致しているが、計算では堆積による河床面上昇がほとんど進行せず、 $t=15.0\text{sec.}$ においても厚い流動層が残る結果となっている。なお、初期河床を固定床としたRun1-2-2について同様の計算を行ったところ、堆積がほとんど進行しない結果となった。

図-8は同じ実験ケースについて圧力勾配を考慮した平衡勾配による計算結果と実験結果とを比較したものである。上流区間では移動床状態が維持されており、計算では高濃度の土石流が勾配変化点に流入している。また、実験では固定床の場合と比して堆積区間の遡上が速くなる傾向が現れている。両者を比較すると、堆積の初期過程における堆積形状はかなり一致しており、最終堆積形状も、堆積侵食速度式に非定常効果を導入しない場合の計算よりも全体の堆積量が若干増加しており、より実験結果に近い結果が得られていた。

5. おわりに

勾配急減点近傍における土石流の堆積過程を河床状態の相違による変化を含めて実験によって詳細に調べた。その結果、上流区間が固定で外力が降伏応力を上回る場合には、二層流モデルでは予測しきれない堆積区間の上流区間で堆積面に上に凸の折れ曲がり形状が現れることが確認された。これは、流れの慣性力のため、下流の堆積区間の河床を移動状態に加速する効果が現れることによるものと解釈できる。

そこで、堆積過程について堆積侵食速度式に流れの非定常効果を導入した場合の計算結果を実験結果と比較して検討した。水路床を固定床とした場合、平衡勾配に圧力項と慣性項を導入し、降伏応力に係わる粒子による静的な圧力と降伏応力に係わらない動的な圧力との比を一定値とした計算によって、堆積の初期過程を表現できることが判った。しかしながら、供給濃度が高濃度となると計算による堆積が過小に評価される傾向が現れたため、必ずしもこの方法が全ての条件に対して優れているとはいえない結果となった。一方、水路床を移動床とした場合では、平衡勾配の評価に圧力項を導入し、降伏応力に係わる粒子による静的な圧力と係わらない動的な圧力との比を濃度の関数として与える計算によって、堆積の初期過程が表されることが示された。したがって、すべての領域を同一の方法では再現できない結果となった。この点について、より汎用性のあるモデルを構築するには、今回得られた数値実験結果を基礎的な資料として、流れの非定常効果についてさらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘：土石流から掃流状集合流動へ遷移する流れの解析法に関する研究，水工学論文集，第44巻，683-686，2000
- 2) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘・蜂谷圭：土石流の堆積侵食過程に関する実験と二層流モデルによる解析，水工学論文集，第46巻，2002.
- 3) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘：一次元モデルによる土石流の土砂流出に関する数値実験，水工学論文集，第45巻，pp.691-696，2001
- 4) 伊藤隆郭・江頭進治・宮本邦明・竹内宏隆：土石流の固定床から移動床流れへの遷移過程に関する研究，水工学論文集，第43巻635-640，1999.
- 5) 江頭進治・芦田和男・佐々木浩：土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，pp.485-490，1988
- 6) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈：水工学論文集，第41巻，789-794，1997

(2001. 10. 1受付)