

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

NUMERICAL EXPERIMENTS ON SEDIMENT DISCHARGE OF DEBRIS FLOW BY A 1-D MODEL

高濱淳一郎¹・藤田裕一郎²・近藤康弘³

Jun-ichiro TAKAHAMA, Yuichiro FUJITA and Yasuhiro KONDO

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 工学研究科土木工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Sediment discharge hydrograph by debris flows, peak discharge in particular, must be estimated to design countermeasures against debris, such as check dams and guide walls. As this phenomenon has a high unsteadiness, effects of pressure gradient and inertia terms in basic equations which are closely related to non-stationariness are examined by numerical experiments under simple conditions. A debris flow model proposed by the authors were employed, and the kinematic wave and the dynamic wave calculations were carried out, by using first an equation for erosion-deposition rate of a conventional type and second those added with pressure and inertia terms. Kinematic wave produced fairly similar results to those by dynamic wave except for wave shapes around peaks and recession stage. The pressure term introduced into erosion-deposition rates caused prominent undulations in hydrographs which were mitigated very much by the inertia term.

Key Words : Debris Flow, Sediment Graph, Numerical Experiments, Debris Flow Model

1. はじめに

我が国は気候的・地形的特色から、土砂災害の発生頻度が高い国といえる。その中でも土石流災害は大きな被害をもたらすものであり、ソフト及びハードの両面においての対策が重要となっている。その中で土石流発生時の土砂流出予測は土石流対策を講じる上で最も基本的な情報を与えるものであり、土地利用のあり方や防災施設の配備を検討するためには、土砂流出の総量だけでなく、そのピーク流量を予測することが重要となってくる。

洪水ハイドログラフを予測する際には、運動方程式として圧力項と慣性項を省いたKinematic Wave、慣性項を省略したDiffusion Wave、あるいは全てを考慮したDynamic Waveが用いられている。しかし、土石流による土砂流出現象における圧力項や慣性項の効果については、侵食・堆積現象へ及ぼす影響も含めて十分には検討されていない。これらの効果を調べるための手段としては単純なケースを対象とした数値実験が有効であると考えられる。そこで、本研究は、提案してきた内部境界を考慮

した一次元計算モデル¹⁾を用いて土石流の数値実験を実施し、土砂流出現象における圧力勾配、慣性力の影響について検討した。すなわち、まず、Dynamic WaveとKinematic Waveによる解析を比較し、ついで、侵食堆積速度に流れの非定常効果を反映させるため、その評価式に運動方程式における圧力項や慣性項を付加した場合の数値実験を行い、その特性について検討した。

2. 数値モデルの基礎方程式¹⁾

数値計算には、流れを上層の水流層と下層の砂礫層とに分離した二層流モデルの支配方程式¹⁾を用いる。

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial (v_w h_w)}{\partial x} = s_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial (v_s h_s)}{\partial x} = s_T - s_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial (c_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial (c_s v_s h_s)}{\partial x} = c_s s_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -s_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w v_w^2 h_w)}{\partial x} - \rho_w s_i u_i \quad (5)$$

$$= \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \tau_w$$

$$\frac{\partial(\rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \rho_w s_i u_i \quad (6)$$

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

ここに、 t は時間、 x は流下方向の座標、 h_w は水流層厚、 h_s は砂礫移動層厚、 ρ_w は水流層の密度、 ρ_s は砂礫層の密度、 v_w は水流層の平均流速、 v_s は砂礫層の平均流速、 P_w は水流層に作用する圧力、 P_s は砂礫層に作用する圧力、 g は重力加速度、 u_i は両層間のinterfaceの位置における速度であり、 c_s は砂礫移動層内の平均体積濃度で $c_s = c_*/2$ 、 c_* は堆積層濃度、 z_b は河床位、 s_T は河床侵食速度、 s_i はinterfaceを通じた水の上向きのフラックスである。また、interfaceにおけるせん断力 τ_w と河床面せん断力 τ_b には江頭らの構成則²⁾を一様濃度 c_s に適用したものをを用いる。

$$\tau_w = \rho_w f_w |v_w - u_i| (v_w - u_i) \quad (7)$$

$$\tau_b = (\rho_s - \rho_w) g h_s \frac{1}{1 + \alpha} \cos \theta \tan \phi + \rho_w f_s |v_s| v_s \quad (8)$$

ここに、

$$f_w = \left[\frac{1}{\kappa} \left\{ \left(1 + \frac{\eta_0}{h_w} \right) \ln \left(1 + \frac{h_w}{\eta_0} \right) - 1 \right\} \right]^{-2}$$

$$f_s = \frac{W + GY_k}{9 f(c_s) GY_k^2 \left[(W + GY_k)^{3/2} + \frac{2}{5} \frac{1}{GY_k} \{ W^{5/2} - (W + GY_k)^{5/2} \} \right]^2} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2}$$

$$f(c_s) = k_f \frac{(1 - c_s)^{5/3}}{c_s^{2/3}} + k_g \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) c_s^{1/3} \quad W = \frac{\tau_w}{\rho g h_s}$$

$$GY_k = \{ (\sigma/\rho - 1) c_s + 1 \} \sin \theta - (\sigma/\rho - 1) c_s \cos \theta \frac{1}{1 + \alpha} \tan \phi$$

ここで、 κ はカルマン定数であり、江頭らは水流層に対数則を適用し、その原点をinterfaceの位置($c = 0.05$ となる位置)から、この濃度に相当する粒子間隙スケール η_0 だけ下方にとり、 $h_s \leq z \leq h_s + h_w$ で流速分布を評価している。ここでは、 η_0 に平均濃度 $c_s = c_*/2$ での間隙スケールに相当する長さを与えている。 k_f 、 k_g は経験定数でそれぞれ0.16~0.25, 0.0828、 d : 粒径、 e : 反発係数(0.85)、 ϕ は砂礫の内部摩擦角で $\tan \phi = 0.8$ である。なお、原著で α は濃度の関数となるが、本解析では一定値($\alpha = 0.25$)としている。

侵食速度は江頭らによる侵食速度式³⁾を二層流に拡張

して評価する。

$$s_T = v_i \tan(\theta - \theta_e) \quad (10)$$

ここに、 v_i は二層流全体の平均流速、 θ_e は全層平均濃度 c_i に対応する平衡勾配であり、式(16)に示す河床面における力の釣り合い式から、次式で表される。

$$v_i = v_s \frac{h_s}{h_i} + v_w \frac{h_w}{h_i} \quad (11)$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1) c_i}{(\sigma/\rho - 1) c_i + 1} \tan \phi \quad (12)$$

$$c_i = c_s \frac{h_s}{h_i} \quad (13)$$

ここに、 h_i は砂礫移動層厚と水流層厚とを合わせた全流動層厚である。 v_i の評価法については砂礫層平均流速なども考えられるが、全層水流層となる状態への接続を簡単にすることと、また、このような設定により、実験値を概ね説明できている⁴⁾ことから、本解析では式(10)~(13)の形式で侵食体積速度を評価する。なお、計算において、全層平均濃度が $c_*/2$ 以上になるときは全層砂礫層として計算し、このときの砂礫層濃度は全層平均濃度($c_*/2$ 以上)となる。

3. kinematic WaveとDynamic Waveによる土砂流

出ハイドログラフの比較

Dynamic Waveでは運動方程式に式(5)、(6)をそのまま用い、Kinematic Waveでは両式において慣性項、圧力項、運動量交換項を省略して計算する。

数値実験は、水平長10m、勾配18°の幅一様水路に粒径0.35cmの一樣砂を厚さ10cm敷き詰めた飽和移動床に対して上流端から単位幅あたり100cm²/sの水を5秒間供給するという条件で実施した。図-1~4にそれぞれの方法によるハイドログラフと流動深の変化が上流端からの距離毎に示している。なお、両計算とも、 $x=2m$ に達するまでに全層が砂礫層の状態に達しており、解析では砂礫層の濃度を一様としているため、輸送濃度は全層濃度と一致している。図からわかるようにDynamic Waveで計算した場合、上流ではフロント部にパルス状の波形をしたピークが現れ、それが下流に向けてシャープなピーク波形となり、ピーク値は $x=8m$ 付近まで増加する傾向にある。一方、Kinematic Waveではこのようなパルス状のピークは現れず、 $x=8m$ の付近からのピーク値の減衰も著しい。このように両者の違いはフロント部通過直後のピークの波形と低減部の形状に現れる。ピーク値は流量、流動深ともDynamic Waveの方が大きく、また、ピーク値出現時からの流量の低減はDynamic Waveの方が急である。輸送濃度については、両者に有意な差は見られず、 $x=4m$ 以降ではフロント部通過直後の流動層濃度は勾配18°に対応

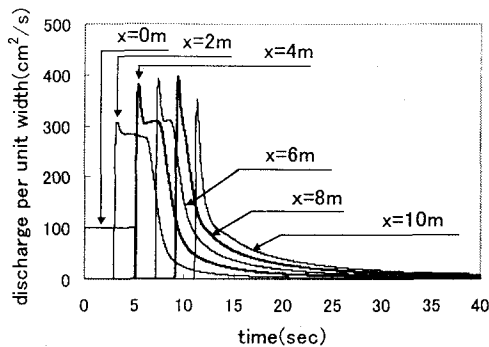


図-1 Dynamic Waveによるハイドログラフ ($\theta = 18^\circ$)

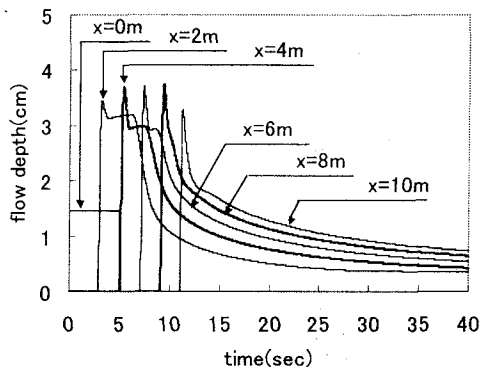


図-2 Dynamic Waveによる各地点の流動深 ($\theta = 18^\circ$)

する平衡濃度に近い値となっている。次に河床勾配を 14° 、 10° と変えて計算してみると、Dynamic Waveで現れたパルス状の波形は河床勾配の減少とともに小さくなり、ハイドログラフのピーク値はKinematic Waveの計算結果に近づいてくることが確認された。運動を厳密に解析するという点ではDynamic Waveの方が優れており、本計算結果から、特に、急勾配区間における侵食現象を解析するときには、Dynamic Waveを用いるべきである。

4. 堆積侵食速度に流れの非定常性を導入した数値実験

次に、侵食・堆積に及ぼす圧力勾配、慣性力の影響について検討するために、江頭らの侵食速度式における平衡勾配にDynamic Waveの運動方程式中の圧力項、慣性項を導入することを試み、式(1)～(10)の基礎方程式を用いた解析を行った。

江頭らの侵食速度式(10)における平衡勾配は江頭らの構成則に基づいた次式に示す河床面における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。

$$\begin{aligned} & \{(\sigma - \rho)c_i + \rho\}gh_i \sin \theta_{e0} \\ & - (\sigma - \rho)c_i gh_i \cos \theta_{e0} \tan \phi = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、式(14)に式(5)、(6)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、次式ようになる。

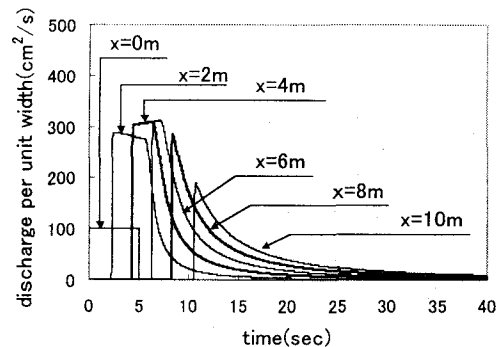


図-3 Kinematic Waveによるハイドログラフ ($\theta = 18^\circ$)

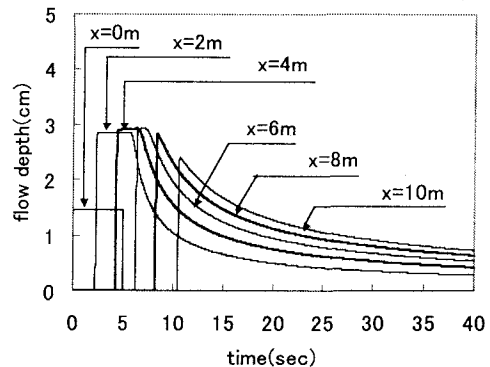


図-4 Kinematic Waveによる各地点の流動深 ($\theta = 18^\circ$)

$$\begin{aligned} & \{(\sigma - \rho)c_i + \rho\}gh_i \sin \theta_{ep} - \cos \theta_{ep} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x} \\ & - (\sigma - \rho)c_i gh_i \cos \theta_{ep} \tan \phi_s = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 $P_{w0} = P_w / \cos \theta_{ep}$ 、 $P_{s0} = P_s / \cos \theta_{ep}$ である。式(15)より、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。

$$\tan \theta_{ep} = \tan \theta_{e0} + \frac{1}{\{(\sigma/\rho - 1)c_i + 1\}} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x} \quad (16)$$

式(16)より、 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が必要である。しかしながら、式(10)の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(14)に式(5)(6)の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。この見かけ上の平衡勾配を θ_{et} 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。

$$\theta_{et} = \theta_{ep} + \arcsin \left\{ D / (\rho gh_i \sqrt{A}) \right\} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} D = & \frac{\partial(\rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s v_s^2 h_s)}{\partial x} \\ \text{ここに、} & \frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w v_w^2 h_w)}{\partial x} \end{aligned} \quad (18)$$

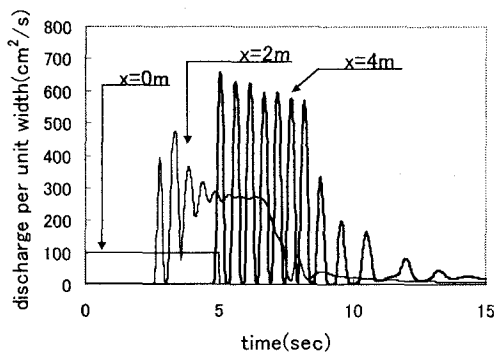


図-5 平衡勾配を θ_{ep} とした場合のハイドログラフ($\theta = 18^\circ$)

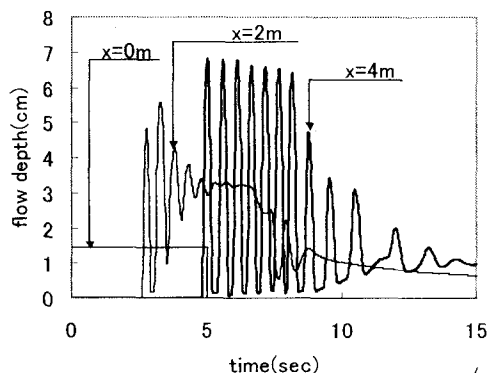


図-6 平衡勾配を θ_{ep} とした場合の流動深($\theta = 18^\circ$)

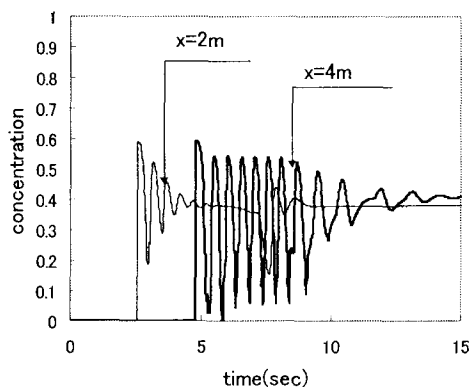


図-7 平衡勾配を θ_{ep} とした場合の輸送濃度($\theta = 18^\circ$)

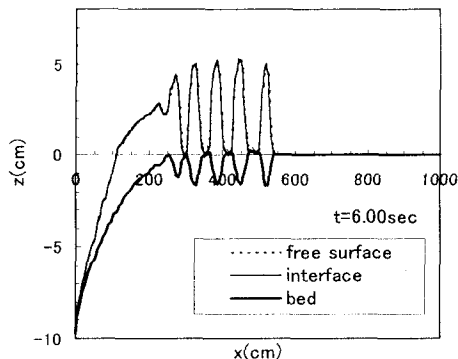


図-8 平衡勾配を θ_{ep} とした場合の縦断面図

($\theta = 18^\circ$ $t = 6.0 \text{ sec}$)

$$A = \{(\sigma/\rho - 1)c_i + 1\}^2 + \left\{(\sigma/\rho - 1)c_i \tan \phi + \frac{1}{\rho g h_i} \frac{\partial(P_{wo} + P_{so})}{\partial x}\right\}^2 \quad (19)$$

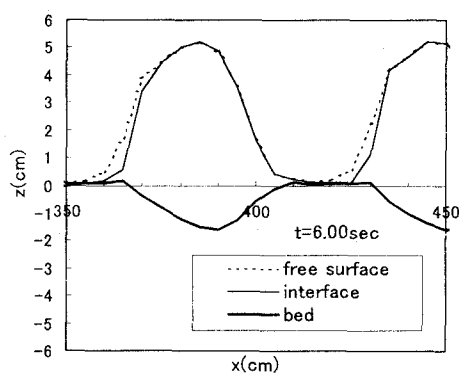


図-9 平衡勾配を θ_{ep} とした場合の拡大縦断面図

($\theta = 18^\circ$ $t = 6.0 \text{ sec}$)

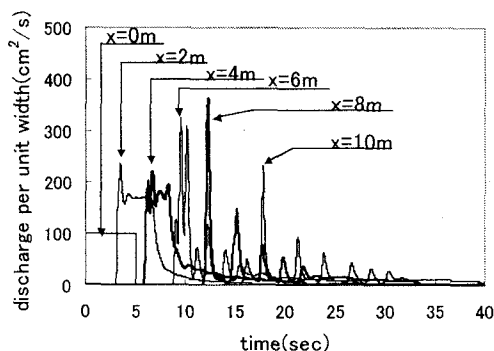


図-10 平衡勾配を θ_{ep} とした場合のハイドログラフ($\theta = 14^\circ$)

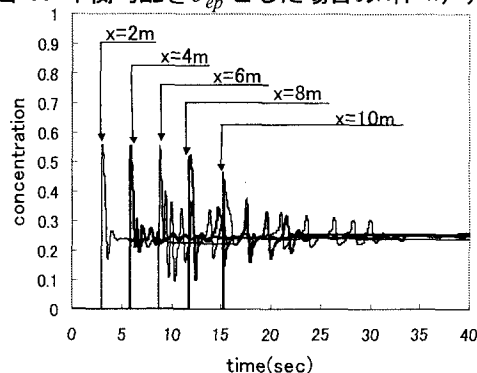


図-11 平衡勾配を θ_{ep} とした場合の輸送濃度($\theta = 14^\circ$)

圧力項のみを考慮した θ_{ep} を用いた場合の計算結果として、図-5～7には $x=0, 2, 4\text{m}$ における流量、流動深、および輸送濃度の時間的変化を示し、図-8には $t=6.0\text{sec}$ における縦断面変化を、図-9には $x=350\sim 450\text{cm}$ 区間を拡大して示している。これらの図はフロント部の到達後、ほぼ一定の時間間隔で流れが振動することを表しており、この傾向は $x=4\text{m}$ 以降で顕著になる。波状の流れの下流側では全層が砂礫層となっており、一方、上流側では僅かに水流層が分離している。この波状変化は、最初、先端部の流下に伴う侵食進行過程で、先端部で流動深が厚くなり、その背面で流動深が小さくなり、それが下流に順次伝播していったことを示している。この理由として、以下のプロセスが考えられる。まず、先端部における水面勾配（これを順勾配という）により、流れ方向の圧力勾配の影響で侵食量が増加し、フロント部での流動深が増加していく。次に、その背後では水面勾配が逆勾配とな

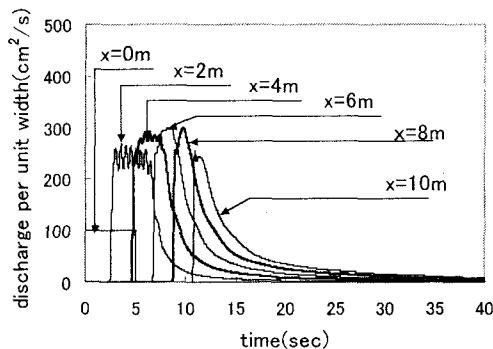


図-12 見かけの平衡勾配を θ_{et} とした場合のハイドログラフ
($\theta = 18^\circ$)

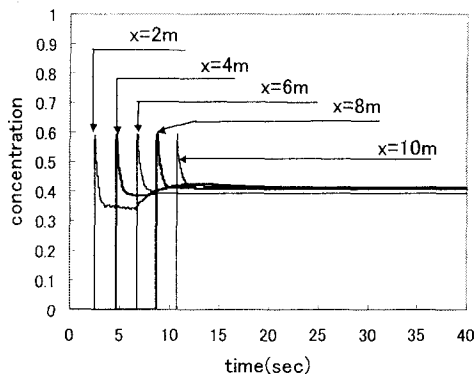


図-13 見かけの平衡勾配を θ_{et} とした場合の輸送濃度
($\theta = 18^\circ$)

り、侵食が抑えられ、条件によっては堆積が生じる。このような傾向が続くと、発達したフロント部が後続流よりも高い速度で流下し、後続部の流動深が小さくなっていく。このため、その背後に水面が再び順勾配となる区間が発生し、この区間で上述のサイクルを繰り返していく結果、段波状の自由表面が先端部から下流へと伝播されていくものと考えられる。つまり、フロント部での侵食量の増加が引き起こした結果であると解釈される。この点を確認するために、水路勾配を順次緩勾配にするか、あるいは供給濃度を高くして計算すると、侵食量が減少していく傾向になるため、このような波状流動深変化や勾配 18° とした条件でも図-9のような水流層の発生は抑えられていく傾向が見られた。図-10, 11には、平衡勾配に圧力項を導入した計算を河床勾配を 14° とした実施した場合のハイドログラフと輸送濃度を示している。図からわかるように、フロント部通過直後に流量のピーク値が現れ、このときの輸送濃度はほぼ堆積層濃度まで達している。フロント部通過後の流量と輸送濃度の振動は依然としてみられるものの、勾配 18° の計算結果と比較してその振幅と周波数はかなり小さくなっている。さて、現地における土石流観測では段波状の流れがしばしば計測され、流量の低減期ではかなり小さな値をとるような観測値も得られている⁹⁾。それらが、圧力勾配の影響による縦断的な侵食・堆積現象の繰り返しと対応しているのか、さらに、図-8, 9に見られる個別の固まりに分離する現象が実際に起こりうるかについては実現象での河床面に関する情報が十分でなく、本解析では掃流状集合流動における砂礫移動層濃度を一定とするなどの近似・仮定を導入しているため、ここで判断することは難

しい。しかしながら、フロント部において水面勾配が流れに駆動力を与えると同時に、この駆動力によって堆積が抑制されるため、フロント部で流量規模が大きく、高濃度になることは十分予想される。

図-12, 13には平衡勾配に運動方程式中の圧力項と慣性項を導入して計算した場合のハイドログラフと輸送濃度を示している。ハイドログラフにはDynamic Waveでみられたようなパルス状の波形はみられないものの、輸送濃度にはフロント部でシャープな波形を伴うピークが現れており、ほぼ堆積層濃度まで達している。平衡勾配に圧力項、あるいは圧力項と慣性項を導入すると、フロント部において高濃度領域が現れる。圧力項のみを導入した場合は、流動面が逆勾配になる領域で堆積が生じるため、後続で波状の流れが現れた。圧力項に加えて慣性項を導入すると、フロント背後での圧力勾配の影響が慣性項によって相殺されたため、堆積現象とそれに伴う振動が抑制されたものと考えられる。圧力項と慣性項を導入した計算を河床勾配を 14° , 10° とした実施すると、Dynamic Waveでみられたようなパルス状の波形を伴うハイドログラフのピークが現れ、輸送濃度は図-13に示すようなフロント部でピーク値をとる。河床勾配 14° の計算ではフロント部の輸送濃度がほぼ堆積層濃度まで達していた。

慣性項の影響を見かけの平衡勾配を導入して評価しているので、定量的な評価は難しく、定性的な傾向は表現できていると思われるが、今後、さらに議論が必要である。

最後に、以上の3つの侵食堆積速度式を用いて、下流側で θ_{e0} に対して堆積が生じるような条件を想定して数値実験を行った。すなわち、上流側水路水平長5m、勾配 18° 、下流側水路水平長5m、勾配 14° の勾配変化点を有する固定床水路に、単位幅あたり $200\text{m}^2/\text{s}$ 、土砂濃度 $c=0.35$ の土石流を20秒間給供給する条件で実施した。計算結果として、図-14, 15には従来の江頭らの平衡勾配を用いた場合のハイドログラフと輸送濃度を、図-16, 17には圧力項と慣性項を考慮した場合の結果を示している。後者の計算で若干流れが振動しているものの、両者はほぼ同じ結果を示している。図-18, 19には圧力項を考慮した場合の $x=8\text{m}$ におけるハイドログラフと輸送濃度を示している。図からわかるように、土石流は波状の流れとなって流下しており、このような流れは勾配変化点より下流側で発生している。この波状変化は流れの先端部が勾配変化点に到達後、フロント部の背面で堆積が生じることにより、その区間で流動深が小さくなり、それが下流へと伝播することで発生している。このとき、土石流の先端部では堆積が生じることなく下流端に到達している。このことは、平衡勾配に圧力勾配を導入すると土石流フロント部のような水面勾配がある領域は侵食されやすく、堆積が生じにくい領域となることに起因している。

5. おわりに

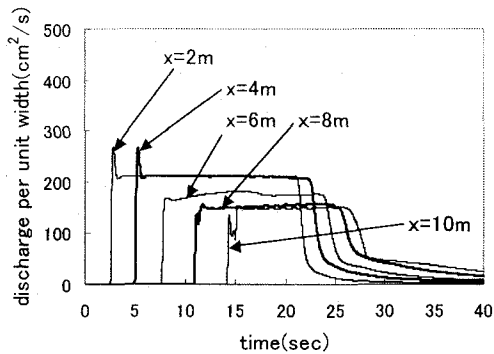


図-14 平衡勾配を θ_{e0} とした場合のハイドログラフ

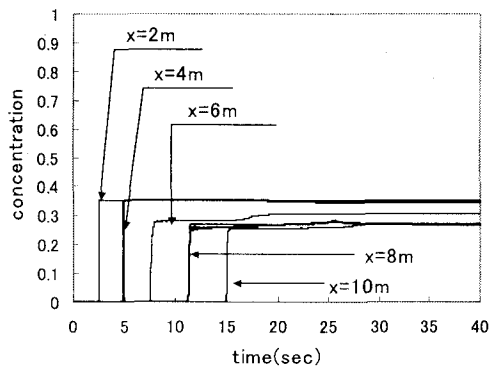


図-15 平衡勾配を θ_{e0} とした場合の輸送濃度

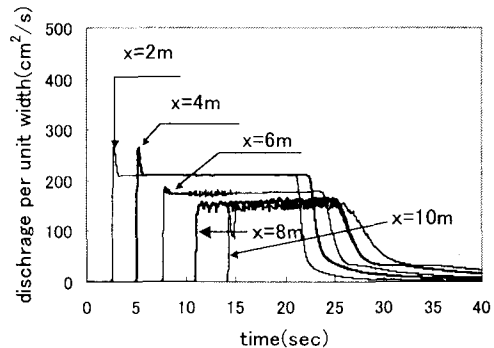


図-16 平衡勾配を θ_{el} とした場合のハイドログラフ

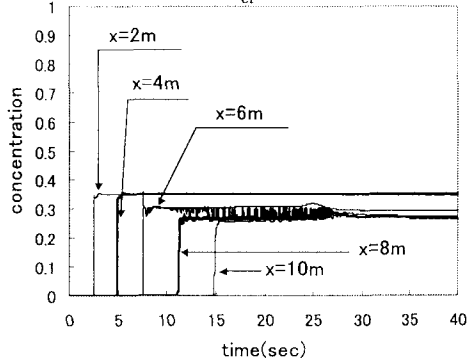


図-17 平衡勾配を θ_{el} とした場合の輸送濃度

土石流による土砂流出現象に及ぼす圧力勾配や慣性項の効果を調べるため、提案している内部境界を考慮した一次元モデルを用いた数値実験を実施した。Dynamic WaveとKinematic Waveを用いた場合の両者の違いは、フロント部通過直後のピークの波形と低減部の形状に現れ、Dynamic Waveにはパルス状のピーク波形が現れ、ピーク値は流量、流動深ともDynamic Waveの方が大きく、ピーク流量発生時からの流量の低減も急である。また、平衡

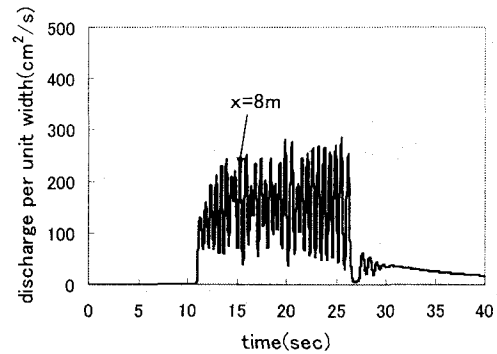


図-18 平衡勾配を θ_{ep} とした場合のハイドログラフ

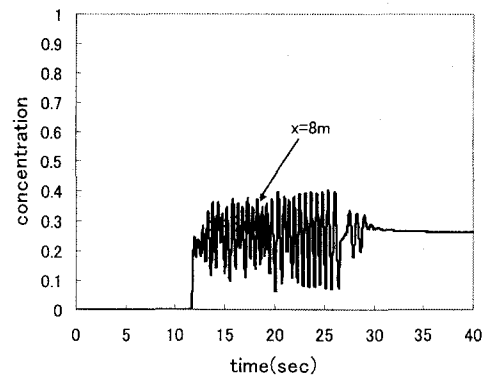


図-19 平衡勾配を θ_{ep} とした場合の輸送濃度

勾配に圧力項を導入すると、フロント部での水面勾配によりこの領域で侵食されやすく、堆積しにくくなるため、条件によっては堆積侵食の過程で波状の流れがフロント部から下流に向かって伝播するような内部不安定が計算された。一方、圧力項に加えて慣性項を導入すると圧力勾配の影響が相殺され、波状変化は顕著でなくなる。土石流の侵食・堆積は運動量の獲得喪失に相当するので、慣性項までを含めて評価すべきであると考えている。しかしながら、本解析では便宜上、見かけの平衡勾配を導入して解析するにとどまっている。今後、侵食堆積速度の評価に関する議論や、数値実験と水路実験との比較を行い、侵食・堆積現象の評価を含めた土砂流出に及ぼす支配方程式の各項の効果について検討を進めたい。

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に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pp.683-686，2000。
- 2) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解，水工学論文集，第41巻pp.789-794，1997。
- 3) 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。
- 4) 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の二層流モデルによる解析とその検討，平成12年度土木学会年次学術講演会概要集，II-238，2000
- 5) 諏訪浩・山越隆雄・佐藤一幸：地盤震動計測による土石流の規模推定，砂防学会誌，Vol.32，No.2，pp.5-13，1999

(2000.10.2受付)