

豪雨性表層崩壊に起因する土石流の規模予測と GISを用いた避難行動の解析

ESTIMATION OF A DEBRIS FLOW HYDROGRAPH AND THE ANALYSIS OF ACTION OF EVACUATION BY MEANS OF GIS

中川 一¹・高橋 保²・澤田豊明¹・石橋晃睦³

Hajime NAKAGAWA, Tamotsu TAKAHASHI, Toyoaki SAWADA and Akichika ISHIBASHI

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒537 宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒537 宇治市五ヶ庄)

³正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-12 茨城県稲敷郡基崎町高崎 2304)

A numerical simulation model for estimating a debris flow hydrograph by assigning an arbitrary rainfall to an arbitrary and very steep basin was developed for computing the hazard area. The debris flow hydrograph is not much influenced by the scale of a surface landslide but is strongly effected by the position and number of landslides. When applied to an actual event, this model reproduced fairly well the actual deposition situation in the fan area. Non-structural countermeasures, such as residents living in the hazard area taking refuge before the debris flow flooding, is effective for saving lives. A simulation method for evacuation that is based on a refuge network built by using the GIS (Geographic Information Systems, ARC/INFO) is presented. The information about calculated results of evacuation is very important and graphical tools of GIS can give it intelligibly for both the administrators and residents.

Key Words : debris flow, evacuation, hydrograph, walking speed, landslide, Horadani

1. はじめに

平成8年12月6日に発生した長野県小谷村蒲原沢の土石流は、前年に起こった豪雨災害の復旧工事を行っていた建設作業員ら14名が亡くなる災害となった。一方、平成9年5月11日に発生した秋田県鹿角市熊沢川で発生した土石流では、地すべりの前兆現象が発見され、温泉の宿泊客らは事前に避難をして、その後に発生した土石流による人命の損失は免れた。ところが、平成9年7月10日に発生した鹿児島県出水市針原川の土石流では、土石流発生の危険性を感じた住民が川の様子を見に出かけたものの、川には水がほとんど流れておらず、避難せずに帰宅してその後の土石流で21名が亡くなる災害となった。このように、土石流による災害はあとをたたく、適切な避難を行って少なくとも人命の損失だけでも無くしていくことが望まれよう。

土石流危険渓流に指定されている渓流は全国に8万ヶ所近くあると言われており、全ての渓流に対してハード対策を講じるには時間と経費がかかりすぎる。発生する土石流の規模とその氾濫・堆積範囲を予測し、危険地域を指定して的確な避難計画を立て、この情報をわかりやすく一般住民に周知することが

人命を守る上で重要であると考えらる。

ここでは、豪雨性表層崩壊に起因して発生する土石流の規模予測を、崩壊規模、崩壊個数、崩壊箇所を種々変化させて行うとともに、得られた土石流ハイドログラフを用いて土石流氾濫・堆積範囲を求める。ついで、GIS(地理情報システム)を用いて構築した避難ネットワーク上で、流域の住民の避難行動を解析する。その際、避難行動に伴う疲労と群集流動による歩行速度の低下、子供、大人、老人の歩行速度を考慮した解析を行うとともに、地域防災計画で指定された避難地では避難に時間がかかりすぎる場合に、新たな避難地を設けることで、避難所要時間の短縮がどの程度図れるか等について検討する。

2. 基礎方程式

土石流は停止の限界までは一種の連続体としての取り扱いが可能であり、運動量保存式及びバルクとしての連続式を以下のように設定する。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (vM)}{\partial y} = g h \sin \theta_{b x o} - g h \cos \theta_{b x o} \frac{\partial (z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_{b x}}{\rho_T} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \beta \frac{\partial(vN)}{\partial y} = gh \sin \theta_{byo} - gh \cos \theta_{byo} \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_T} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i \{C_* + (1 - C_*)S_b\} + r \quad (3)$$

固体分に対する連続式は、石礫同士の衝突効果によって支えられるような粗粒成分と流れの中に浮遊するような細粒成分に分けて考えれば、それぞれ

$$\frac{\partial(C_L h)}{\partial t} + \frac{\partial(C_L M)}{\partial x} + \frac{\partial(C_L N)}{\partial y} = \begin{cases} i C_{*L} & (i \geq 0) \\ i C_{*DL} & (i < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\partial\{(1 - C_L)C_F h\}}{\partial t} + \frac{\partial\{(1 - C_L)C_F M\}}{\partial x} + \frac{\partial\{(1 - C_L)C_F N\}}{\partial y} = \begin{cases} i(1 - C_L)C_{*F} & (i \geq 0) \\ i(1 - C_{*DL})C_F & (i < 0) \end{cases} \quad (5)$$

のように設定する。ここに、 M, N は x および y 方向の流量フラックスで、 $M = uh$, $N = vh$, u, v ; 流速, h ; 流動深, g ; 重力加速度, z_b ; 堆積あるいは侵食深, θ_{byo} , θ_{byo} ; 元河床からの傾斜角, ρ_T ; 土石流の見掛けの密度, β , 運動量補正係数で1.25¹⁾, τ_{bx} , τ_{by} ; 底面せん断応力, i ; 侵食(≥ 0)あるいは堆積(< 0)速度, C_* ; 河床材料の体積濃度, S_b ; 河床材料の飽和度, r ; 単位長さ当たりの横流入流量の強度, C_L ; 土石流中の粗粒径成分の体積濃度, C_F ; 細粒径成分の体積濃度, C_{*L} , C_{*F} ; それぞれ河床材料の粗粒径および細粒径成分の体積濃度, C_{*DL} ; 土石流中の粗粒径成分が堆積する時の体積濃度である。なお、土石流が発生するような狭隘な溪流では一次元的な取り扱いが可能であり²⁾, (1), (2)式の代わりに石礫型の土石流に対しては

$$u = \frac{2}{5d_L} \left[\frac{g \sin \theta}{a \sin \alpha} \left\{ C_L + (1 - C_L) \frac{\rho_m}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \times \left\{ \left(\frac{C_{*DL}}{C_L} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{3/2} \quad (6)$$

が成立し、掃流状集合流動、掃流に対してはそれぞれ次の(7), (8)式が適用可能とする。

$$u = \frac{0.7\sqrt{g}}{d_L} h^{3/2} \sin^{1/2} \theta \quad (7) \quad u = \frac{1}{n_m} h^{2/3} \sin^{1/2} \theta \quad (8)$$

ここに、 d_L , 粗粒子径, σ , 砂礫の密度, ρ_m ; 粗粒子の間隙泥水の密度, n_m ; マニングの粗度係数, a ; 定数($= 0.04$), α ; 砂礫の動摩擦係数($\tan \alpha = 0.6$), θ ; エネルギー勾配で $\tan \theta = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} / \rho_T gh$ である。なお、掃流は C_L が2%以下あるいは $h/d_L > 30$ の時とし、掃流状集合流動は $C_L < 0.4C_*$ の場合とした。

底面せん断応力については、石礫型土石流では、

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_T}{8} \left(\frac{d_L}{h} \right)^2 \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{\{C_L + (1 - C_L)\rho_m / \sigma\} \{C_{*DL} / C_L\}^{1/3} - 1} \quad (9)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_T}{8} \left(\frac{d_L}{h} \right)^2 \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{\{C_L + (1 - C_L)\rho_m / \sigma\} \{C_{*DL} / C_L\}^{1/3} - 1} \quad (10)$$

とし³⁾, 掃流状集合流動では、

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_T}{0.49} \left(\frac{d_L}{h} \right)^2 u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (11)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_T}{0.49} \left(\frac{d_L}{h} \right)^2 v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (12)$$

掃流では(8)式のマニング則が成り立つとする。

不飽和の河床における侵食速度式については、

$$\frac{i}{\sqrt{gh}} = K \sin^{3/2} \theta \left\{ 1 - \frac{\sigma - \rho_m}{\rho_m} C_L \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} \right) \right\}^{1/2} \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} - 1 \right) (C_{T\infty} - C_L) \frac{h}{d_L} \quad (13)$$

が成り立ち⁴⁾, 飽和河床上では次式が成立する²⁾。

$$i = \delta_e \frac{C_{T\infty}}{C_* - C_{T\infty}} \left\{ 1 - \frac{C_L}{C_{T\infty}} \frac{\rho_m}{\rho} \frac{\tan \phi - (C_T / C_{T\infty})(C_{L\infty} / C_L)(\rho / \rho_m) \tan \theta}{\tan \phi - \tan \theta} \right\} \frac{q_T}{d_L} \quad (14)$$

ここに、 K, δ_e ; 定数, ϕ , 内部摩擦角, ρ ; 清水の密度, $C_{T\infty}, C_{L\infty}$; 平衡濃度であり、石礫型土石流では

$$C_{T\infty} = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (15)$$

$$C_{L\infty} = \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (16)$$

であり、掃流状集合流動、掃流では $C_{L\infty}$ は

$$C_{S\infty} = 6.7 C_{T\infty}^2 \quad (17) \quad C_{L\infty} = q_B / (hu) \quad (18)$$

のように表される。ここに q_B は流砂量であって⁴⁾,

$$\frac{q_B}{\{(\sigma / \rho - 1) g d_L^3\}^{1/2}} = \frac{1 + 5 \tan \theta}{\cos \theta} \sqrt{\frac{8}{f} \left(1 - \bar{\alpha}^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \bar{\alpha} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right)} \quad (19)$$

で表され、 f ; 抵抗係数, τ_* , τ_{*c} ; それぞれ無次元掃流力, 無次元限界掃流力, $\bar{\alpha}$; 係数である。

堆積速度については、石礫型土石流の場合、勾配が急に緩くなった地点で直ちに堆積するのではないので、慣性的な流動を考慮し、堆積が生じる限界の流速 v_e よりもかなり遅くなった ($v = p v_e$, $p = 1/3$) 地点から下流で行われると考え、次式を用いる⁵⁾。

$$i = \delta_d \left(1 - \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{p v_e} \right) \frac{C_{L\infty} - C_L}{C_{*DL}} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (20)$$

なお、掃流状集合流動および掃流の時には慣性的な効果を見出し、以下のような堆積速度式を用いる。

$$i = \delta'_d \frac{C_{S\infty} - C_L}{C_{*DL}} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (21)$$

$$i = \delta''_d \frac{C_{B\infty} - C_L}{C_{*DL}} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (22)$$

ここに、 $\delta_d, \delta'_d, \delta''_d$ は定数で1とする。なお、堆積も侵食も生じないで流動できる限界の流速 v_e は、(6)式の θ に、次式で与えられる平衡勾配の θ_e を代入して求める流速である。

$$\tan \theta_e = \{C_L(\sigma - \rho_m) \tan \phi\} / \{C_L(\sigma - \rho_m) + \rho_m\} \quad (23)$$

なお、河床位の変化は $\partial z_b / \partial t + i = 0$ より求める。

3. 土石流ハイドログラフ

(1) 対象流域

1979年8月22日午前7時45分頃に岐阜県古城郡上宝村枋尾の洞谷で発生した土石流については、災害直後に詳細な調査が行われて報告書⁶⁾が出されており、また、著者等も種々の観点から検討を加えてきたので^{7), 8)}、本研究においてもこの土石流を対象に考察を進めることにする。

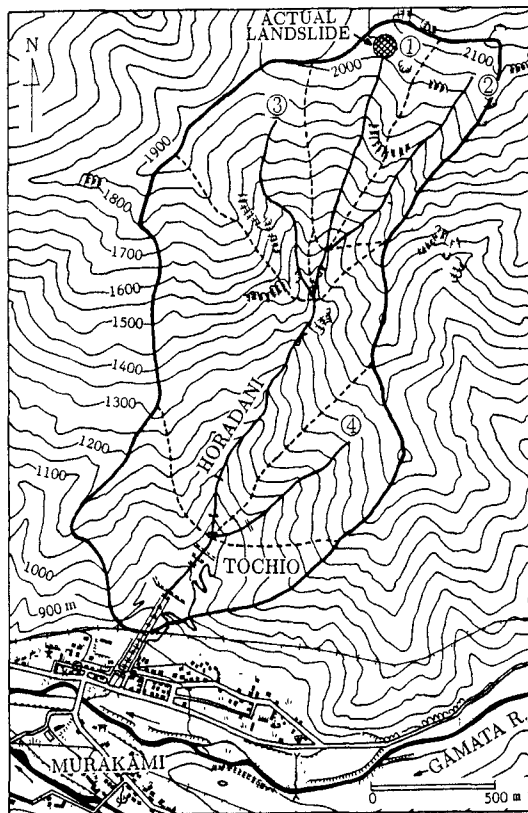


図-1 洞谷流域

洞谷は図-1に示すように、神通川上流の蒲田川右支川で、流域面積が約2.3km²、幹川流路長1,400mの急流河川である。図-2は枋尾地区で氾濫・堆積した土石流の実績であり、総堆積土砂量は約66,000m³と見積もられている。この土石流は図-1に示した①での豪雨性表層崩壊が引き金となって発生したと考え

られており、その崩壊土量は約8,740m³、そのうち流出した部分は3,000 m³程度であると考えられている。

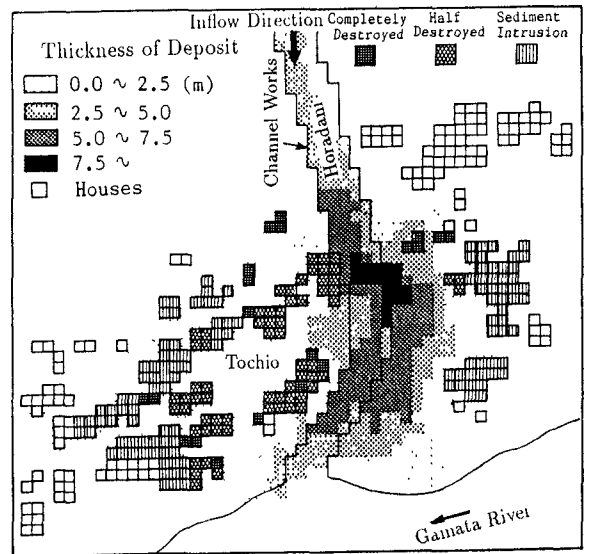


図-2 洞谷土石流の氾濫・堆積の実績

(2) 計算手法

土石流のハイドログラフを計算するには溪流の各地点での洪水流量を前もって求めておく必要がある。その方法については文献⁸⁾に詳しいのでここでは説明を割愛することとし、土石流が発生しなかったとして求められた洞谷下流端(枋尾の扇頂部)での洪水ハイドログラフを図-3に示しておく。このハイドログラフをもとに、図-1に示した①~④の支川(この内のどれかを本川として取り扱う)に対しては各流域面積の割合に応じた流量を本川への強制横流入として、残流域に対しては単位長さ当たりの横流入として与え、洞谷の各地点の洪水流量を評価した。

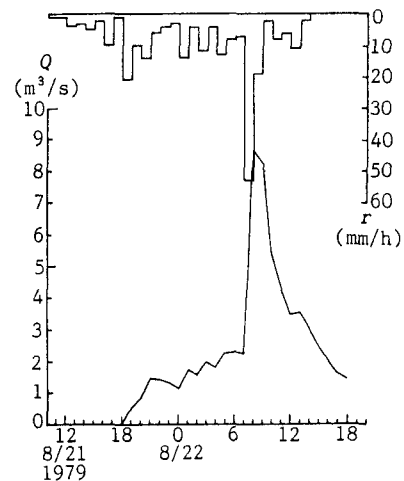


図-3 洞谷下流端での洪水ハイドログラフ

図-4は、例えば本川を①とした場合に各支川からの強制横流入流量と残流域からの横流入流量を与えて、土石流の発生を計算するためのメッシュ分割図である。土石流ハイドログラフの計算は、メッシュサイズ $\Delta x = 50$ m、差分時間間隔 $\Delta t = 0.2$ 秒として行

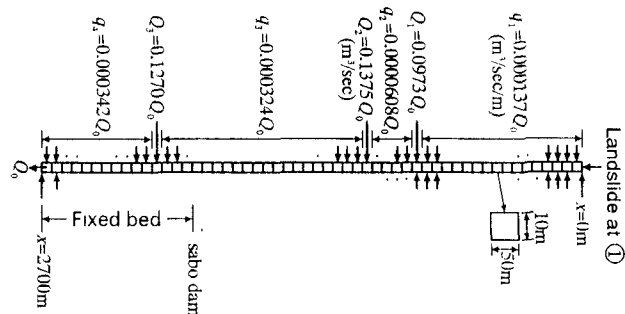


図-4 洞谷の計算メッシュ (①を本川とした場合)

った。なお、計算に用いた諸元は現地調査結果を参考にして、渓流の堆積土層厚 $D = 4\text{m}$, $d_L = 10\text{cm}$, $C_* = 0.65$, $C_{*F} = 0.2$, $C_{*L} = (C_* - C_{*F}) / (1 - C_{*F}) = 0.563$, $\tan \phi = 0.75$, $\sigma = 2.65\text{g/cm}^3$, $\rho = 1.0\text{g/cm}^3$ とした。飽和度 S_b は、勾配が 21 度より緩いところでは 1.0, 急なところでは 0.8 と仮定している。侵食速度の係数 K 及び δ_e については、既に水理模型実験の結果をもとにそれぞれ 0.05, 0.0007 という値を同定しており²⁾, これらの値が実際の土石流についてもある程度適用できることが確認されている⁹⁾。

(3) 土石流ハイドログラフに対する崩壊規模の影響

図-5 は、支川①の上流端に粗粒子土砂濃度 $C_L = 0.5$, 細粒子土砂濃度 $C_F = 0$, 単位幅流量が 20, 40, 60, 80 m^3/s の土石流を 10 秒間供給することで崩壊規模の違いを模擬した場合の発生土石流のハイドログラフを示したものである。この場合、供給土砂量（実質分）はそれぞれ 1,000, 2,000, 3,000, 4,000 m^3 である。同図より、崩壊規模が大きいほど流量のピーク値が若干大きくなり、流出時刻も若干早まるものの、崩壊の規模はハイドログラフにほとんど影響していない。ただし、針原川の土石流のように大規模な深層崩壊に対しては渓床堆積物の侵食よりも崩壊土砂そのものが流動化した流れとなるため、このような流動現象に対しては別途モデル化が必要となろう。

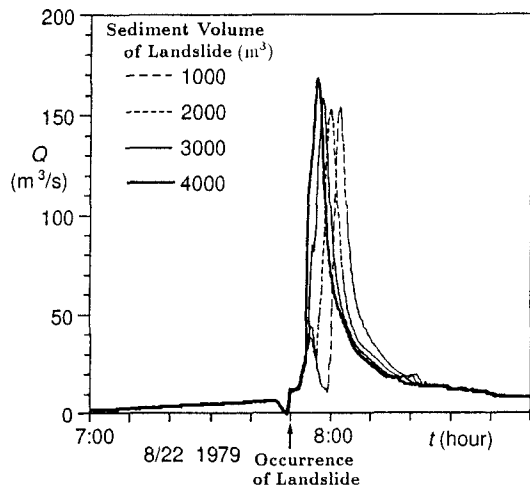


図-5 土石流ハイドログラフに対する崩壊規模の影響

(4) 土石流ハイドログラフに対する崩壊位置の影響

図-6 は各支川①～④の最上流端から (3) と同様の方法で 40 m^3/s の単位幅流量を与えた場合（実際の崩壊流出土砂量に相当）の土石流ハイドログラフを示したものである。同図より、崩壊発生地点の違いでハイドログラフが大きく違っていることがわかる。これは、たとえば④で崩壊が発生した時には支川長が短いため渓床堆積物が少なく、大規模な土石流にまで発達できないからであり、流路長が長い②では最大のピーク流量を呈している。

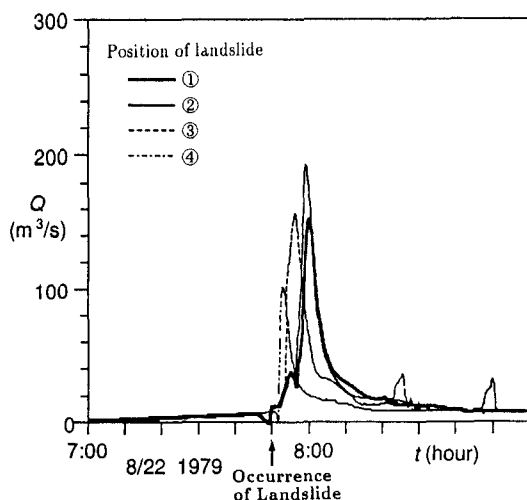


図-6 土石流ハイドログラフに対する崩壊位置の影響

(5) 土石流ハイドログラフに対する崩壊個数の影響

図-7 は①と②で同時に崩壊が発生した場合と、②の崩壊が①の崩壊よりも 10 分遅れて発生した場合の土石流ハイドログラフを示したものである。前者のピーク流量は他のどれよりも大きくなっており、後者ではピーク流量が小さくなって二山のピークを持ち、継続時間が長いハイドログラフとなっているのが特徴である。なお、各上流端から与えた崩壊土砂量や濃度等は同じである。

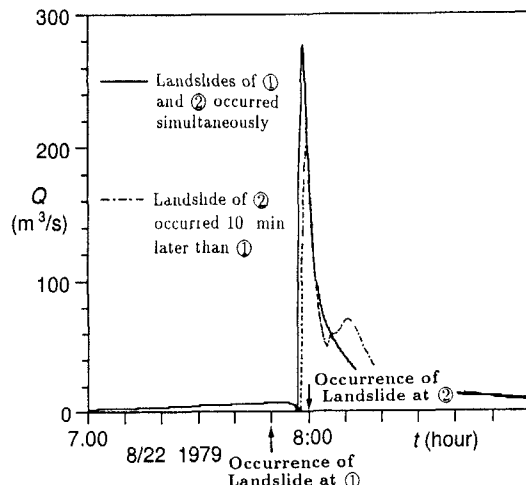


図-7 土石流ハイドログラフに対する崩壊個数の影響

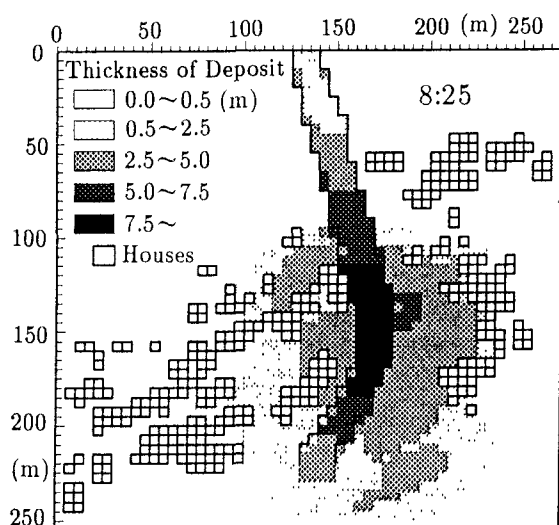


図-8 土石流氾濫・堆積の計算結果 (CASE 1)

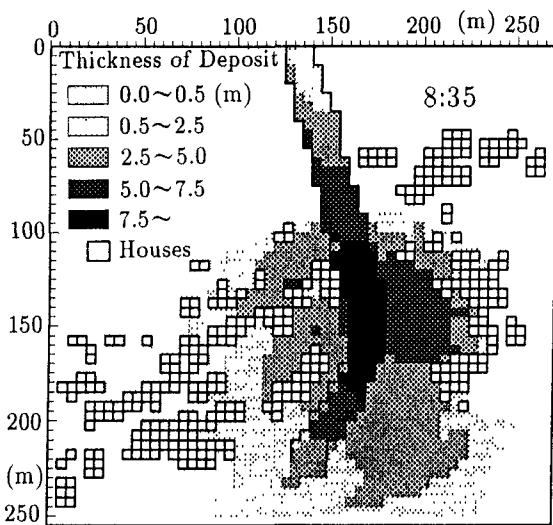


図-9 土石流氾濫・堆積の計算結果 (CASE 1)

4. 土石流の氾濫・堆積範囲の予測法

3. で得られた土石流ハイドログラフや石礫濃度等の値を枳尾扇頂部での流入境界条件として与えることで、扇状地での土石流氾濫・堆積範囲が予測できる。なお、(20)～(22)式の堆積速度式は二次元に拡張して用いることとする。計算条件は①でのみ崩壊が発生した場合 (CASE-1) と、①と②とで同時に崩壊が発生した場合 (CASE-2) との2通りを考え、計算の空間差分間隔を $\Delta x = \Delta y = 5\text{m}$ 、時間差分間隔を $\Delta t = 0.02$ 秒とした。図-8 はほぼ堆積が終了した時点での CASE-1 の計算結果を表したものである。この計算条件は実際の土石流規模のものであり、計算結果も比較的良好に図-2 に示した実績の堆積範囲や規模を再現していると言えよう。図-9 は CASE-2 の計算結果を示している。CASE-1 に比して堆積規模は大きくなっているが、堆積範囲はほぼ同様であり、この流域での土石流氾濫・堆積の基本的な特徴をこの結果は表していると考えられる。

5. 枳尾地区周辺住民の避難行動の解析

(1) GISに基づく避難ネットワークの構築

著者らはこれまで洪水氾濫や泥流氾濫を対象とした住民の避難行動の解析を手がけてきた^{10), 11)}。その際、主要道路網を主体とした避難ネットワークの構築を手作業に頼っており、ノード番号とアーク番号との対応付けに極めて慎重で多大な労力を要してきた。ところが、GIS (以下 ARC/INFO を対象として述べる) ではディジタイザ入力により自動的にノードとアークの対応付けがなされ、極めて容易にネットワークが構築できるので、煩雑なデータ管理やデータの更新にも省力化が図られる。

図-10 はノードとアークから成るネットワークの

一例であるが、ノードと中間点の Vertex をディジタイザで入力するとアークとノードとを対応付けたテーブルが自動的に作成される。ここで重要な点は、ネットワークデータが GIS で容易に作成され、入力データの座標が ASCII データとして利用できることで避難行動の解析に利用できるだけでなく、GIS データとしての道路網、標高、家屋、河川等の地図情報とともに避難行動の解析結果が容易に表示可能なことである。また、家屋情報に家屋評価額、家族構成や障害者等の有無を属性として持たせれば、家屋被害額の評価や避難行動の解析に有用なデータとなる。

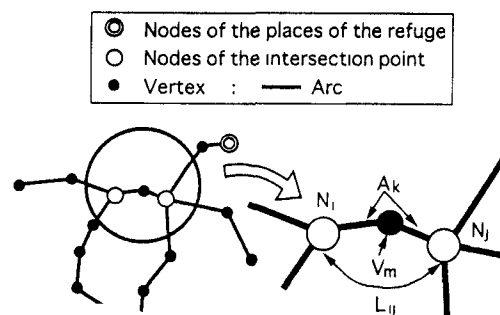


図-10 避難ネットワークの一例

(2) 避難行動のシミュレーション手法

住民の避難行動を、GIS で構築したネットワーク上に位置する家屋から避難地までの最短経路選択問題に定式化して解析する。ここでは著者らが以前に開発した手法を援用するため、その詳細については参考文献 10), 11) に委ねることとして説明を省略するが、新たに大人、老人、子供の歩行速度を考慮した解析を行う。住民の避難行動は家族単位で行われるものとし、時刻 t 、経路 n における歩行速度 U_n^t を、

$$U_n^t = \begin{cases} \bar{U}_0 - C\rho_n^t & (\rho_n^t < \rho_{\max}) \\ \bar{U}_{\min} & (\rho_n^t \geq \rho_{\max}) \end{cases} \quad (24)$$

で表す。ここに、 $\bar{U}_0$ は初期歩行速度で、大人では 1.42m/s, 老人単独では 0.948m/s, 集団歩行では 0.751m/s, 子供連れの場合は 1.02m/s とする¹²⁾。ただし、家族の中に老人や子供が含まれている場合には最小となる歩行速度に依存すると考える。 $\bar{U}_{min}$ は群集流動の最遅歩行速度で、一律に 0.49m/s とする。 C は歩行速度の低下の割合を示す係数で、 $C = (\bar{U}_0 - \bar{U}_{min}) / \rho_{max}$, ρ_{max} は許容最大群集密度で 3.85 人/m² である。避難開始から t 時間経過した時の疲労による歩行速度の割引率 T^t は、西原¹³⁾ にならい

$$T^t = 1.0 / \{0.982 + \exp(1.12t - 4.0)\} \quad (\text{unit: hour}) \quad (25)$$
のように設定する。したがって、時刻 t における経路 n 上での歩行速度は $V_n^t = T^t U_n^t$ で表される。

(3) 避難行動の計算条件と計算結果

表-1 に平成 7 年度の住民台帳をもとにした栃尾、村上、柏当地区の世帯数と大人、子供、老人の構成を示す。老人の割合が 20% 以上で、高齢化が進んだ地域である。避難命令が発令されてからどれ位の所要時間で避難地まで移動できるか、どのルートが最適か等を知っておくことは避難計画を立てる上で重要であろう。そこで、表-2 に示すような条件で 6 通りの避難行動の解析を行った。なお、指定されている避難地は 3 ヶ所で、アーク数 512, ノード数 490 である。表-2 には計算結果も示されているが、全員大人として計算した場合と老人や子供を考慮した場合とでは後者の方が平均避難所要時間で 1.5 倍、最大避難所要時間で約 2 倍近くになっていることがわかる。また、CASE 2 と CASE 6 を見ると新たに避難地を設けることで最大避難所要時間を半分以下に、平均所要時間でも約半分程度にできることがわかる。

表-2 避難行動の計算条件及び計算結果

CASE No.	計 算 条 件	地区名	平均避難所要時間(秒)	最大避難所要時間(秒)
1	歩行速度：全員大人の歩行速度 避難地選択：最寄りの避難地	栃尾	378	839
		村上	292	426
		柏当	277	515
		全体	346	839
2	歩行速度：大人、老人、子供の歩行速度考慮 避難地選択：最寄りの避難地	栃尾	548	1588
		村上	473	805
		柏当	434	767
		全体	516	1588
3	歩行速度：全員大人の歩行速度 避難地選択：栃尾小学校	栃尾	378	839
		村上	493	644
		柏当	711	837
		全体	449	839
4	歩行速度：大人、老人、子供の歩行速度考慮 避難地選択：栃尾小学校	栃尾	548	1588
		村上	795	1216
		柏当	1113	1585
		全体	678	1588
5	歩行速度：全員大人の歩行速度 避難地選択：最寄りの避難地 洞谷左岸に新規避難地設定	栃尾	145	395
		村上	292	426
		柏当	277	515
		全体	193	515
6	歩行速度：大人、老人、子供の歩行速度考慮 避難地選択：最寄りの避難地 洞谷左岸に新規避難地設定	栃尾	209	747
		村上	473	805
		柏当	434	767
		全体	295	767

表-1 栃尾周辺地区の世帯数と年代構成

地区名		栃尾	村上	柏当	合計
世帯数		79	25	17	121
年代構成	大人	171	61	25	257
	子供	49	22	6	77
	老人	52	35	11	98
	合計	272	118	42	432

6. おわりに

本研究で、豪雨性表層崩壊の規模は発生土石流のハイドログラフにはあまり影響せず、崩壊場所、崩壊個数は大きく影響することがわかった。また、老人や子供の歩行速度を考慮した、より現実的な住民の避難行動の解析を行うことが可能となったが、さらに、道路勾配などの地形条件、昼夜等の気候条件等を入れた解析も必要となろう。なお、避難勧告・命令とその解除の基準の設定方法については、緊急に検討すべき重要な事項であることは論を待たない。

参考文献

1) 高橋 保：土石流の力学的挙動、水工学シリーズ、土木学会水理委員会、pp.A-1-1-A-1-17, 1980
2) Takahashi, T., Nakagawa, H. and Kuang, S. Estimation of debris flow hydrograph on varied slope bed, Proc. Corvallis Symp. on Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, pp.167-177, 1987.
3) Takahashi, T.: Debris flow, Monograph of IAHR, Balkema, pp.1-165, 1991
4) Takahashi, T.: High velocity flow in steep erodible channels, Proc. XXII Cong., IAHR, pp.42-53, 1987.
5) Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T. and Yamashiki, Y.: Routing debris flow with particle segregation, Jour. Hydraulic Engg., ASCE, Vol.118, No.11, pp.1490-1507, 1992
6) 建設省神通川水系砂防工事事務所・(株)地域開発コンサルタント：8・22 洞谷土石流被災区域調査および崩壊地調査報告書, pp.1-128, 1979.
7) 高橋 保：洞谷土石流について、新砂防 118, pp.42-46, 1979
8) 高橋 保, 中川 一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 新砂防, Vol.118, pp.42-46, 1979.
9) 中川 一, 高橋 保, 澤田豊明, 里深好文：計画土石流の設定と避難計画, 京大防災研年報, 第 39 号 B-2, pp.347-371, 1996.
10) 高橋 保, 中川 一, 東山 基：洪水氾濫解析とリンクした避難のシミュレーション, 第 33 回水理講演会論文集, pp.355-360, 1989.
11) Takahashi, T., Nakagawa, H., Higashiyama, M. and Sawa, H.: Assessment of evacuation systems for water or mud floods, Jour. Natural Disaster Science, Vol 12, No.2, pp.37-62, 1990.
12) 消防科学総合センター：地域防災データ総覧, 地域避難編, pp.91-96, 1987.
13) 西原 巧：氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究, 京都大学学位論文, pp.166-177, 1983

(1997 9. 30 受付)