

河床堆積物の侵食による土砂流出とそれによる
土砂流扇状地の形成に関する研究

Fan Formation by the Sediment Runoff Due to River Bed Erosion

京都大学防災研究所 高橋 保 Tamotsu Takahashi
京都大学防災研究所 中川 一 Hajime Nakagawa

We had a localized torrential downpour near the Fukui-Gifu prefectural border in September, 1965 (we call this Okuetsu Rainstorm). Especially, Nishitani village in Fukui prefecture (after this disaster, residents in this village moved to another place and now this district is included in Ohno city) suffered crushing damage from this storm. Namely, in Nakajima district which was the main part of the Nishitani village, before the disaster the number of households was 154, but after the disaster, 58 households were swept away and 86 were buried. A distinguishing feature of this disaster was that the bulk of the houses in the main part of the Nakajima district situated on the debris fan which had been formed by the sediment runoff from the Kamata river was buried second floor deep in sediment but not swept away. Judging from the fact-finding survey and data analysis, these houses were buried by the sediment which outflowed and deposited from the Kamata river taking the type of the sediment flow rather than the debris flow.

In this paper, in order to reproduce the burying process of the Nakajima district by the sediment flow, sediment hydrograph of the Kamata river is evaluated by the calculation of the bed level variation at first, then by using this sediment hydrograph as a input boundary condition, simulation of the horizontally two-dimensional bed level variation in Nakajima district is carried out, and it is found that the calculated results are comparatively in good agreement with actual phenomena.

Keywords: Okuetsu Rainstorm, sediment hazard, sediment flow, simulation

1. はじめに

昭和40年9月、福井・岐阜県境付近に集中豪雨（これを奥越豪雨と呼んでいる）が発生し、とくに福井県西谷村（現在大野市）は壊滅的な災害を被った。すなわち、西谷村の中心をなす中島地区では、被災前の世帯数154戸のうち、流失58戸、埋没86戸を記録し、まさに壊滅状態となった。この災害の特徴は、中島地区の大部分を構成する鎌田川扇状地上に立地する家屋の大半が、鎌田川から流出した土砂によって所によっては2階まで埋没したものがあるが、ほとんど流失には至っていないということである。なお、上記流失戸数58戸とあるのは、その大半は扇状地上に立地していたものではなく、扇状地直下流の真名川の高水敷上に立地していた家屋が、対岸の斜面崩壊によって真名川に形成された天然ダムの堰上げによる洪水氾濫で流されたものである。災害調査結果やその後の検討の結果、扇状地上に立地していた中島地区の家屋は、大規模な土石流というよりもむしろ、比較的長時間にわたって扇状地背後に展開する鎌田川から流出・堆積した土砂流によって埋没したものと推察された。

本研究においては、まず、鎌田川からの流出土砂のハイドログラフを、河床堆積物の侵食による河床変動を計算することにより評価し、その結果得られる下流端での流砂量を扇状地頂部での流入境界条件として用い、扇状地での土砂流の氾濫・堆積による中島地区埋没過程の再現を試みる。

2. 流域および災害の概要

昭和40年9月10日に台風23号が西日本を横断し、ついで17日には台風24号が中部日本を横断して各地に被害が生じた。この昭和40年9月の災害を特徴付けるものは台風そのものによるものではなく、これらの台風の間、9月13日頃からほぼ日本列島に沿って停滞していた前線に、まだ1000km以上離れた位置にあった台風24号が影響して西日本各地に大雨が生じたことである。

福井県地方は14日の日中は全般に一樣な雨が降っていたが、夜に入って奥越地方に集中して激しく降り、15日の15時過ぎになってようやく降雨域も分散し始め、それが東の方へ移動し始めて集中豪雨は解消に向かった。本集中豪雨の中心となった福井県西谷村本戸では、14日9時から15日9時までの日雨量が844mm、13日9時から16日9時までの3日雨量が1044mmにも達し、14日22時頃には降雨強度が90mm以上となっていた¹⁾。

中島地区は図1に示すように笹生川と雲川との合流点にあり、地区の中心を鎌谷(鎌田川)が貫流している。すなわち、中島地区の主要部分はこの鎌谷が形成した扇状地上に立地していたのである。文献^{2),3),4),5)}および著者の内の一人の当時の聞き取り等によると、災害の時間経過は以下のようなものである。

9月14日19時頃より特に激しく降り出した集中豪雨は、21時頃から、鎌田川からのおびただしい土砂流出をもたらし、夜半から15日の2時頃にかけて、役場や学校を含む中島地区の大半を埋没させ、一部の家屋を流失せしめた。その間、9月14日22時頃には笹生川を挟んだ対岸にある木落し谷も土石流を発生し、家屋3戸を埋没させた。また、笹生川に架かる県道のコンクリート橋の橋台部分が流失し、笹生川の洪水が対岸側の中島地区を直撃するような形となって扇状地の東側1/3位に立地する家屋をことごとく流失させた。

15日午前8時30分(文献3)による。文献2)では10時、4)では11時頃、1)では8時5分とある。)コアソ谷に山崩れが発生し、これが真名川を堰き止める天然ダムを形成した。このため、ダム上流部で洪水が上流へ波及し、15日9時頃³⁾中島地区の雲川左岸側の家屋を上流へ向かって流失させた。この天然ダムはやがて決壊し、それによって生じた大洪水が約1km下流の上笹又を襲い、地区前の川底が土砂で浅くなって川幅が次第に家屋群の方向に拡大して、15日の11時頃には上笹又の川岸に近い21戸が流失した。

上記の経過より明らかなように、流失家屋の大半は天然ダムの影響による洪水と橋梁付近の岸決壊・洪水氾濫によっており、土砂流出によっては、二階まで埋没しているものがあるがほとんど流失に至っていないのである。すなわち、鎌田川および上笹又の裏山の沢からの土砂流出は大規模な土石流と言うよりも、むしろ、比較的長時間にわたって流出・堆積した土砂流によるものと推察される。

中島地区では上記のような甚大な被害を受けたが、地区住民には死者・行方不明者は一人も生じていないのが不幸中の幸いであった。これは、14日の21時頃には鎌田川に架かったコンクリートの橋の上を流れが越え、川は腐敗した泥のような悪臭を放ち濁流となって流れていたことから、村当局が危険を察知して直ちに地区住民に避難命令を出し、住民を扇頂部付近の比較的安全な場所にある寺へ避難させたことによっている²⁾。

3. 鎌田川の洪水ハイドログラフ

すでに述べたように、福井県西谷村中島地区の大半を埋没させた原因はその背後に展開する鎌谷(鎌田川)からの土砂流出であった。ここでは、まずその土砂流出を生ぜしめた洪水ハイドログラフの再現を行う。

鎌田川は図2に示すように、羽毛状をした流域面積約3.8km²の小河川である。主流路長は約3,400mであり、その縦断形状は図3のようで、下流側約1/3が上流部に比べて急勾配となっている。しかしながら本流域の溪床勾配は支溪も含めて土石流発生勾配(15°)よりも緩く、中島地区を埋めた土砂は掃流あるいは掃流状集合流動として流出したものであると考えられる。実際に災害直後に撮影された空中写真(撮影:昭和40年10月1日,1/12,500,阪急航空)においても、上流部支溪および本流にはとくに土石流痕跡は認められず、主として中流以下の主流の侵食による土砂が流出したことを示唆している。

さて、本流域から土砂流出量を求めるには、まず、洪水流出量を把握する必要がある。流出計算法には各種のものがあるが、基礎となる資料がほとんどないので、ここでは簡単な線形の貯留関数法⁶⁾を適用する。すなわち、流域平均貯留高 $s(\text{mm})$ が比流量 $q(\text{mm/hr})$ に一次比例すると仮定し、降雨強度を $r(\text{mm/hr})$ として連続式を用いると次式が得られる。

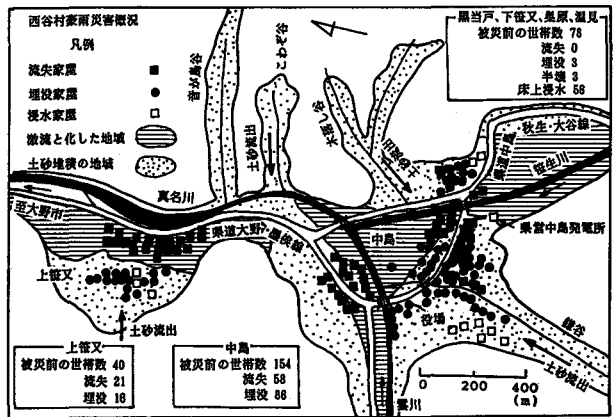


図1 中島および上笹又の被災状況(文献¹⁾より)

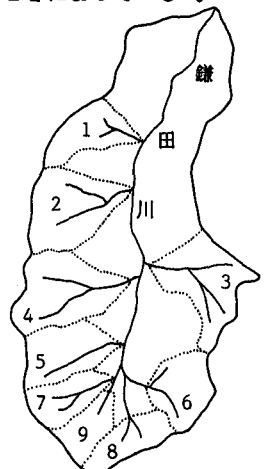


図2 鎌田川平面図

$$k \frac{dq}{dt} = r - q \quad (1)$$

ここに、 k は比例定数である。これを階差式に直すと次式のようになる。

$$k \frac{q(t+\Delta t) - q(t)}{\Delta t} = \frac{r(t+\Delta t) + r(t)}{2} - \frac{q(t+\Delta t) + q(t)}{2} \quad (2)$$

結局、比流量 q は次式となる。

$$q(t+\Delta t) = C \frac{r(t+\Delta t) + r(t)}{2} + (1-C)q(t) \quad (3)$$

ここに、 $C = (\Delta t/k)/(1+\Delta t/2k)$ である。 r に本戸の1時間降雨強度を与え、 $C=0.3$ 、初期流量を0として(3)式を計算した結果を図4に示す。このようにして求めた最大流量 $79 \text{ m}^3/\text{sec}$ は、合理式

$$Q_p = \frac{1}{3.6} f r A \quad (4)$$

において $f=0.8$ 、 $r=89 \text{ mm/hr}$ (本戸の最大降雨強度)、 $A=3.8 \text{ km}^2$ として求めたピーク流量 $Q_p=75 \text{ m}^3/\text{sec}$ とほぼ一致している。

図4の流量ハイドログラフは流域出口におけるものであるが、主流に沿って流砂量を求めるためには、主流の各場所での流量ハイドログラフが必要となる。実際には支浜が合流する地点で離散的に流量が変化するはずであるが、本流域が比較的長方形に近い羽毛状流域であることから、主流路延長 $L (= 3,400 \text{ m})$ に沿って一様な横流入があるものとみなす。流水が主流の最上流から流域出口まで到達するのに必要な時間を無視すれば

$$Q_I + q_{in} L = Q_0 \quad (5)$$

が成立する。ここに、 Q_I ：主流最上流へ流入する流量、 q_{in} ：主流路単位長さ当りの横流入流量、 Q_0 ：流域出口の流量である。最上流の支浜の流域面積は 0.13 km^2 であるので、 $Q_I = (0.13/3.8) Q_0 = 0.034 Q_0$ として $L=3,400 \text{ m}$ を代入して(5)式から q_{in} を求めることができる。

4. 鎌田川の土砂ハイドログラフ

流砂量は以下の式を連立して解くことによって求められる。

$$\text{水流の運動量式:} \quad \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} = gh \sin \theta_x - gh \cos \theta_x \frac{\partial (z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho} \quad (6)$$

$$\text{水流の連続式:} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = q_{in} \quad (7)$$

$$\text{抵抗則:} \quad \frac{\tau_b}{\rho} = \frac{f}{8} u |u| = \frac{gn^2 u |u|}{h^{1/3}} \quad (8)$$

流砂量式には、急勾配の掃流状集合流動をも含んだ領域で成立する次式⁷⁾を用いる。

$$\frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd}} = \frac{1 + 5 \tan \theta}{\cos \theta} \sqrt{\frac{8}{f} \tau_*^{3/2} \left(1 - \alpha^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)} \left(1 - \alpha \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (9)$$

$$\text{エネルギー勾配:} \quad I_e = \frac{\tau_b}{\rho gh} = \frac{n^2 u |u|}{h^{4/3}} \quad (10)$$

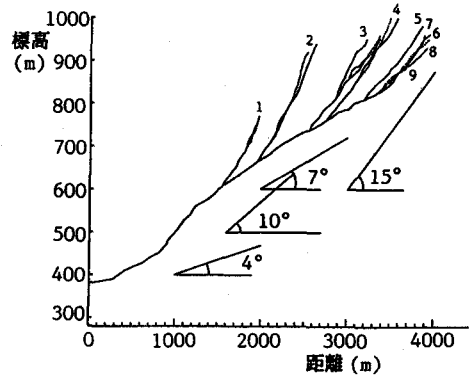


図3 鎌田川縦断面図

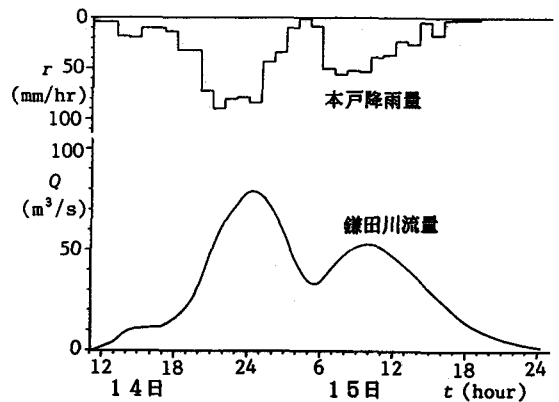


図4 鎌田川の計算ハイドログラフ

$$\text{流砂の連続式: } \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{C_*} \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

ここに、 $M = uh$, u : 平均流速, h : 水深, n : マニングの粗度係数, θ_x : x 軸の傾斜角, τ_b : 底面摩擦力, ρ : 水の密度, σ : 砂礫の密度, g : 重力加速度, z_b : 堆積厚さ, f : 摩擦損失係数, q_b : 単位幅流砂量, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力 ($= 0.04 \times 10^{1.72 I_e}$), α : 係数, C_* : 堆積層の砂礫濃度である。ただし、

$$\alpha^2 = \frac{2 \left(0.425 - \frac{\sigma}{\sigma - \rho} \tan \theta \right)}{1 - \frac{\sigma}{\sigma - \rho} \tan \theta} \quad (12)$$

$$\tau_* \geq 0.2 \text{ のとき: } \sqrt{\frac{8}{f}} = A + 5.75 \log \left\{ \frac{(\sigma/\rho - 1) \tau_*}{I_e (1 + 2\tau_*)} \right\} \quad (13)$$

$$\tau_* < 0.2 \text{ のとき: } \sqrt{\frac{8}{f}} = A + 5.75 \log \left\{ \frac{0.2(\sigma/\rho - 1)}{1.4 I_e} \right\} \quad (14)$$

$$I_e \geq 0.08 \text{ のとき: } A = 0.04 I_e^{-2} \quad (15)$$

$$I_e < 0.08 \text{ のとき: } A = 6.0 \quad (16)$$

である。

鎌田川の代表的河幅を求めるために、断面について 1/25,000 の地形図から横断面形を求め、代表河幅として 20m を採用した。代表粒径は不明であるが、ここでは、実地調査時の印象から $d = 5\text{cm}$ を用いた。(13) および (14) 式を用いると摩擦損失係数が求まり、マニングの粗度係数は与える必要が無いのであるが、(13), (14) 式から f を求める手続きはかなり複雑であるため、ここではマニングの粗度係数 $n = 0.03$ の一定値を与えて水流に関する計算をまず行い、その後、流砂量の計算にのみ (13), (14) 式を用いた。このような方法は多少の矛盾を含んでいるとしなければならないが、ここでは流出土砂量のおよその検討をするのが目的であるのでこのような便法をとっている。

図 5 はこのようにして求めた鎌田川出口での流出土砂量である。ただし、これは実質体積を示しており、総流出土砂量は約 16 万 m^3 となっている。流出した土砂が堆積した場合の空隙率を 35% ($C_* = 0.65$) とすれば、堆積した土砂の体積は 24.6 万 m^3 となり、当時の中島での堆積土量が約 17 万 m^3 とされている³⁾ ことからすれば、本川へ流出した分を差し引いても少し過大な見積りかも知れないが、当時の見積りの精度の問題や堆積土砂の平均粒径がもう少し大きかったことも考えられる。

図 6 は鎌田川の河床変動の計算結果である。実際には下流部には砂防ダムが存在していたし、上流部の河道の状況など詳しい踏査もしていないので、このような計算結果がどれほど実際の現象を説明しているかよく分からないが、河床変動の傾向は出ているものと思われる。なお、下流端では河床高が変化しない条件、すなわち下流端格子における流出流砂量には直上流の流砂量を与えている。それにしても河床低下量が約 10m 程度の部分があるのはやや過大かも知れないが、そのようになった原因としては、先のように粒径を少し小さ目に見積ったことや、支流からの流砂量を見積りしていること等が考えられる。

5. 中島扇状地の土砂埋没過程

さて、図 5 のような土砂流出があったものとして、図 7 のように簡略化して示した中島扇状地上への氾濫・

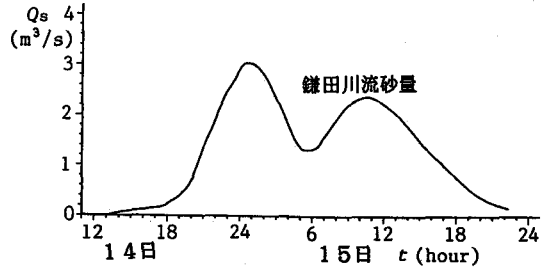


図 5 鎌田川流砂量計算値

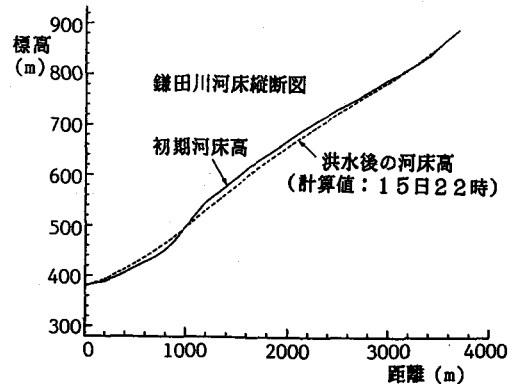


図 6 鎌田川の河床変動の計算結果

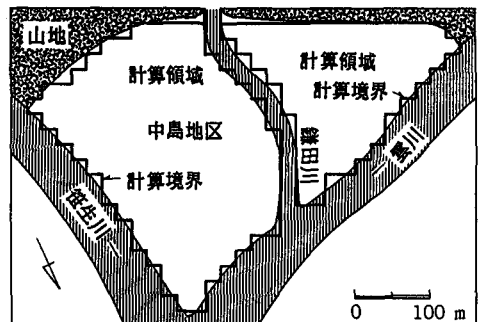


図 7 中島扇状地

堆積過程の解析を行ってみる。解析は上記水流および流砂量の式を二次元場のものに変換することによって行える。用いる基礎方程式系は以下のようである。

$$\text{水流の}x\text{方向運動量式: } \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = gh \sin \theta_x - gh \cos \theta_x \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (17)$$

$$\text{水流の}y\text{方向運動量式: } \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = gh \sin \theta_y - gh \cos \theta_y \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (18)$$

$$\text{水流の連続式: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

$$\text{抵抗則: } \frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (20)$$

$$\text{流砂の連続式: } \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{C_*} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0 \quad (21)$$

流砂量は一次元の(9)式を用いるが、これを

$$q_{bx} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} q_b, \quad q_{by} = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} q_b \quad (22)$$

のように流速成分の比で x 成分と y 成分に配分する。流砂量式に含まれる限界掃流力は一次元の場合と同じく、

$$\tau_{*c} = 0.04 \times 10^{1.72 I_e} \quad (23)$$

を用いる。ここに、 I_e は流れのエネルギー勾配で、次式で表わされる。

$$I_e = \tan \theta = \frac{n^2 U |U|}{h^{4/3}}, \quad U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (24)$$

計算に際して、空間差分間隔として $\Delta x = \Delta y = 20\text{m}$ 、時間差分間隔として $\Delta t = 0.2\text{sec}$ とし、鎌田川を格子サイズに選んでその深さを 1.5m とし、扇面は扇頂部から河川合流点へ向けて一方向にだけ 2° の傾斜を持つ平面であると仮定している。また、雲川および笹生川と接続する鎌田川および扇状地の下流端はいずれも段落ち状態になっているものとする。

図8は氾濫・堆積過程の解析結果である。本計算においては14日20時には扇面への薄い氾濫が生じており、目撃記録の21時頃よりも少し早めのようなのであるが、流出土砂量の計算では扇頂部上流に存在していた砂防ダムの効果を考慮していないのでそのようになったのかも知れない。図には順次氾濫面の拡がりや堆積厚さの増大の傾向を時間を追って示している。15日の5時には氾濫はほぼ扇面全体に達しており、堆積厚さも扇頂付近では2～3mに達している。15日の23時の最終状態においては、扇面全体が1～4mの土砂に覆われており、実際の状況とはほぼ一致している。

6. おわりに

土石流扇状地の二次的な侵食による土砂流扇状地の形成については、以前、水理実験と数値シミュレーションとの比較を行い、本手法である程度現象が説明されることを示したが⁹⁾、実際の土砂流の氾濫・堆積現象にもここで示したモデルが適用可能であることが確認できた。土砂流は土石流同様強大な破壊力を持っており、土砂災害を軽減するためにもその流動のメカニズムをさらに詳細に明らかにし、それをもとにハードおよびソフト対策を講じることが重要である。今後、土砂の粒度分布を考慮した解析についても検討を加えていく予定である。

<参考文献>

- 1) 全国防災協会:わが国の災害誌(続),1976,pp.248-254.
- 2) 科学技術庁資源調査会:九頭竜川の治山治水調査に関する報告,1966,324p.
- 3) 横田忠夫:西谷村水害被災者調査報告,1965,p.17.
- 4) 科学技術庁資源開発調査会:九頭竜川流域の水害地形と土地利用,1968,214p.
- 5) 芦田和男・土屋義人・村本嘉雄・大同淳之:土砂流出に伴う洪水災害に関する研究 -九頭竜川の洪水災害-,

文部省科学研究費特定研究成果報告書（昭和 40 年 9 月の豪雨および 24 号台風による風水害の調査とその防災研究, 研究代表者: 松沢 勲）, 1966, pp.68-78.

6) 京都大学防災研究所富山地区災害調査グループ: 富山地区災害調査, 昭和 44 年 8 月水災害の総合調査研究報告書, 1970, pp.40-85.

7) Takahashi, T.: High Velocity Flow in Steep Erodible Channels, Proc. of Session A, XXII Cong., IAHR, Topics in Fluvial Hydraulics, 1987, pp.42-53.

8) 福井県: 三大風水害の記録, 1966, pp.1-280.

9) 高橋 保・中川 一・佐藤広章: 土石流および土砂流扇状地の形成に関する研究, 水理講演会論文集, 第 32 回, 1988, pp.497-502.

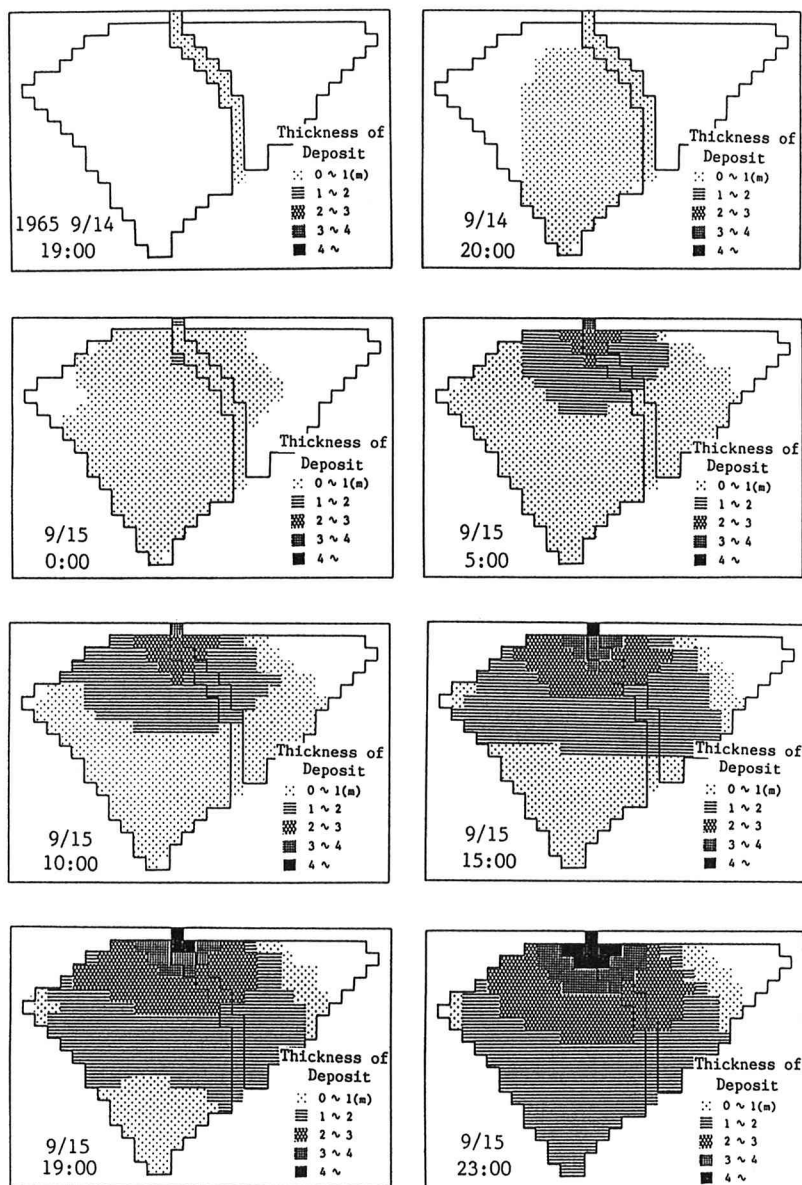


図 8 中島扇状地の埋没プロセスに関する計算結果