

土木研究所資料

降雨逕流分析及其串連之 土石流運動與氾濫型態分析法

2022年3月

國立研究開發法人土木研究所
土砂管理研究團隊火山及土石流小組

降雨逕流分析及其串連之 土石流運動與氾濫型態分析法

火山及土石流小組	前研究員	山崎祐介
火山及土石流小組	研究員	清水武志
火山及土石流小組	前高階研究員	石井靖雄
火山及土石流小組	高階研究員	石田孝司

要 旨：

為防減土石流所引致災害，有必要進行土石流發生時期與氾濫範圍推定。近年來隨著降雨、航空攝影與高程數據等時空間解析度提高，能取得即時精細數據的研究環境也已建立，火山及土石流小組開發進一步提升土石流氾濫危險度評估精度的土石流運動與氾濫（堆積）模式。本資料乃介紹已開發完成的模型及該模型的實際土石流應用案例。此外，附錄提供數據分析程式原始碼及計算時所使用之各項數據。

關鍵詞：降雨逕流、土石流氾濫、數值分析

目錄

1. 前言	1
1.1. 背景與目的	1
1.2. 本資料之構成	3
1.3. 本分析模型之特徵	4
1.3.1. 土石流流量之形成過程	4
1.3.2. 氾濫條件之設定	5
1.4. 本分析模型之課題	7
2. 分析模型	9
2.1. 分析模型概要	9
2.2. 模型分割之目的	13
2.3. 降雨逕流模式	14
2.3.1. 坡面滲流與洪水流控制方程式	14
2.3.2. 河道逕流量之計算方法	17
2.3.3. 河道洪水流之控制方程式	18
2.3.4. 離散化	19
2.4. 土石流運動模式	23
2.4.1. 河床堆積物之安定條件	24
2.4.2. 土石流之控制方程式	25
2.4.3. 土石流溢水量之計算方法	27
2.4.4. 離散化	28
2.5. 土石流氾濫模式	33
2.5.1. 土石流之控制方程式	33
2.5.2. 離散化	35
3. 演算模型的應用案例	40

3.1.降雨逕流模式	41
3.1.1. 分析模型	41
3.1.2. 演算所使用數據與條件	41
3.1.3. 演算結果	41
3.2.土石流運動模式	44
3.2.1. 櫻島有村川之土石流觀測	44
3.2.2. 分析模型	50
3.2.3. 演算所使用數據與條件	50
3.2.4. 演算結果	51
3.3.土石流氾濫模式	53
3.3.1. 阿蘇古惠川土石流災害概要	53
3.3.2. 分析模型	53
3.3.3. 演算所使用數據與條件	55
3.3.4. 演算結果	57
4. 結語	61
A. 附錄	A-1
A.1. 寺內壩之演算法程式集「Terauchi_Dam」	A-2
A.1.1 「01_SET_BASIN」文件夾	A-2
A.1.2 「02_MK_TOPO」文件夾	A-3
A.1.3 「03_MK_RAIN」文件夾	A-4
A.1.4 「04_EXE_SIMU」文件夾	A-5
A.1.5 「05_MK_FIG」文件夾	A-6
A.2. 櫻島有村川之演算法程式集「Arimura_Riv」	A-7
A.2.1 「01_SET_BASIN」文件夾	A-7
A.2.2 「02_MK_TOPO」文件夾	A-8

A.2.3 「03_MK_RAIN」文件夾	· · · · ·	A-9
A.2.4 「04_EXE_SIMU」文件夾	· · · · ·	A-10
A.2.5 「05_MK_FIG」文件夾	· · · · ·	A-10
A.3. 阿蘇古惠川之演算法程式集「Furuegawa_Riv」	· · · · ·	A-11
A.3.1 「01_SET_BASIN」文件夾	· · · · ·	A-11
A.3.2 「02_MK_TOPO」文件夾	· · · · ·	A-12
A.3.3 「03_MK_RAIN」文件夾	· · · · ·	A-14
A.3.4 「04_EXE_SIMU」文件夾	· · · · ·	A-15
A.3.5 「05_MK_FIG」文件夾	· · · · ·	A-17

B. 附錄

程式原始碼

1. 前言

1.1. 背景與目的

土石流災害防減須先推估土石流發生時期與氾濫範圍。確認已形成堰塞湖或火山噴發降灰時，應依修正後的土砂災害防止法，標示國土交通省所推估可能發生土石流災害的區域¹⁾。有關單位因而依據數值模擬演算方法，開發了 QUAD 模型（Quick Analysis System for Debris Flow，土石流快速分析系統）。但本模型係為了火山噴發後可迅速取得分析結果，模式的模擬機能只在某些狀況下才能發揮²⁾。另一方面，也有人推出可供各界無償使用的多功能土石流數值模擬演算軟體，例如依據高橋等研究成果^{3) 4) 5)}開發的 Kanako 模型^{6) 7) 8) 9)}（Kanako 1D 及 Kanako 2D）及依據江頭等研究成果^{10),11)}開發的 iRIC 求解程式（Solver program）Morpho2DH 模型^{12) 13)}。

近年來雨量、空拍照片與高程等時空間解析度不斷提高，能取得高精密度實時數據¹⁴⁾，本火山與土石流小組因此著手開發進一步提升土石流氾濫危險度評估精度之土石流運動與氾濫演算模型。本資料除了說明所開發模型（以下稱為「本分析模型」）與土石流實際應用案例，同時附具運算所使用數據及程式原始碼。此外，本稿將水與土砂混合物例如土石流、泥流、泥砂流與伴隨輸砂產生的洪水流等總稱為「土石流」。

分析程式、輸入與輸出數據處理程式及視覺化程式群總稱為「Debris Flow Simulator for Sabo (DFSS)，砂防土石流模擬程式」。「DFSS」著作人為土木研究所。授權為參考「政府標準利用規約（第 2.0 版）」所開發的創用 CC（CC，創意共享）授權條款標示及繼承第

4 版國際出版證照（以下為 CC BY-SA 4.0）。因此，使用者利用原始碼須承諾並遵守以下二點規定。

1. 標示出著作權來源
2. 繼承（進行二次創作已取得CC BY-SA 4.0 授權）

此外，承諾使用者二次創作，再創作時可進行以下各種運用。

1. 使用者能進行商業用途或改編等自由運用
2. 對於使用者之使用行為，著作權人及相關人不負一切責任
3. 對於使用人之使用行為，著作人及相關人無任何支援義務

1.2. 本資料之構成

本資料之構成如下。

第一章彙整本分析模型之開發背景與目的、本分析模型特徵及本分析模型開發完成後須解決之課題。除了說明本分析模型之特徵並和傳統土石流運動模式土石流流量形成過程的處理方法及氾濫條件設定方法構想之差異作比較之外，也概略說明本模型所採用方法特徵。

第二章一一詳細說明構成本分析模型之降雨逕流模式與土石流氾濫（堆積）模式的基礎公式及其離散化。

第三章就實際發生的降雨逕流、土石流運動與土石流氾濫（堆積），分別說明應用本模型的分析結果。

第四章係依據第三章之結果，進行本分析模型應用效益評估。

第五章說明第三章演算用文件夾構成、分析程式名稱、數據處理程式名稱、輸入檔名以及輸出檔名。

第六章說明程式之原始碼。

1.3. 本分析模型之特徵

土石流的氾濫範圍大致依氾濫地形及土石流氾濫條件亦即氾濫發生位置及其地點的土石流流量而定。若要精密推估其範圍，須分析土石流的發生與流動過程。本分析模型特徵在於就土石流是否會發生考量降雨條件所扮演重要角色，並瞭解降雨逕流過程以及土石流發生與流動過程乃至於土石流的氾濫過程，因此內容包含降雨逕流演算模型、土石流流動演算模型、土石流氾濫演算模型。就土石流從發生到流動過程中流量形成之構成及氾濫條件設定，不同演算模型構想也不同，因此，以下說明早期演算模型（QUAD、Kanakano、Morpho2DH）與本分析模型之差異。

1.3.1. 土石流流量之形成過程

雖然一般認為土石流從發生到運動而形成土石流土砂量的過程乃是崩塌所產生崩土移動之流動化，以及崩土所形成河床堆積物（河道阻塞）或原本河床存在之堆積物受洪水流侵蝕影響被捲入水流而產生流動化，但這些現象很難觀測說明。因此，探討上述過程所形成的土石流流量時，各種模型會產生如下的差異。

QUAD 模型主要針對堰塞湖形成，用土石流的控制方程式¹⁵⁾來說明以回水狀態為初期條件的溢流侵蝕過程，認為河床堆積物係受洪水流侵蝕影響被捲入水流而流動，因此本模型主要計算堰塞湖堤頂土石流流量，火山噴發降灰時則使用有考量降灰影響地表面入滲容量的降雨逕流演算分析方法，並加上所算出容量及該地點坡度大小所產生的不同土砂量，以此算出谷口的土石流流量。Kanakano 模型則從崩塌土量與崩塌持續時間演算流量形態，設定為邊界條件¹⁶⁾。Morpho2DH 模型則以崩塌所產生流動土砂為初期條件，而使用土石流控制方程式決定

之。

本分析模型係以流域為對象使用降雨逕流分析¹⁷⁾，演算從坡面到河道的降雨逕流，然後針對水所輸送過來的河床堆積物進行無限長坡面安定分析¹⁷⁾，將判定為不安定的部分視為流動化部分而以土石流的控制方程式^{10),11),18),19)}算出土石流的流出土砂量。此處也必須考量對於土石流形成與規模大小決定機制具重要影響力的微細土砂往流體層遷移之現象²⁰⁾。

一般認為，火山噴發伴隨產生降灰之後，降灰所形成的地面覆蓋會立刻降低雨水入滲量，並使表面流容易發生亦即容易產生土石流。不過，這部分目前尚無能充分解釋的模型，因此本分析模型雖然仍無法確認入滲容量與降灰厚度之關係，而權宜地設定降灰後各地點雨水入滲容量會隨以降灰厚度為變數的一次函數而減少之模型。

1.3.2. 氾濫條件之設定

QUAD 土石流氾濫形態演算設定谷口為氾濫開始地點，並以此處的土石流流量形態作為邊界條件。因此，谷口周邊的土石流運動演算結果會受邊界條件影響。Kanako (Kanako 2D) 將一維領域 (Kanako 1D) 延伸到二維領域，重疊部分評估其伴隨土石流侵蝕與堆積流動之相互作用。Morpho2DH 因係以二維平面演算整個演算領域，因此無氾濫開始點設定問題。

本分析模型設定降雨逕流模式與土石流運動模式為相同空間，土石流氾濫型態模型則設定為其他空間。這些空間重疊部分在土石流運動模型所算出土石流表面高程超過地盤高程的地點，土石流深度部分使用溢流公式算出土石流溢流量，並以此作為土石流氾濫型態模型之

邊界條件。本分析模型之氾濫發生地點係以土石流沿河道運動過程土石流表面高程與流路側岸地盤高程定之，滿足條件的氾濫發生地點於演算過程依次決定。另一方面，以各氾濫發生地點所演算的溢流量作為氾濫型態模型的邊界條件，因此土石流運動型態模型與土石流氾濫型態模型之相互作用不納入考量。

1.4. 本分析模型之課題

本分析模型旨在依據既有研究成果，儘可能將土石流氾濫範圍推估重要過程模式化，但仍有以下幾點尚未處理，有待進一步研究。

- 坡面崩塌所生產土砂之土砂流出狀況（崩土流出狀況）
- 河床堆積物含砂（細粒土砂）率之時空變化評估
- 溢流時土石流運動之剖面構造
- 土石流對策設施之效益評估

崩土流出過程中該豪雨引致崩塌所生產土砂（崩土）含有率較多的地點，成為河川細粒料（細粒土砂）重要供給源。就崩塌發生原因的探討而言，除了本稿所使用搭配降雨逕流形態分析與無限長坡面安定分析的方法之外，也可使用參考過去崩塌數據與地形數據等統計分析的方法²¹⁾等。崩塌所生產崩土之流出研究，有的進行崩塌發生到土石流形成過程的理論化，有的以質點系（質點動力學）方程式演算伴隨崩土侵蝕與堆積流出過程²³⁾，也有的由崩塌土量與崩塌持續時間算出流量形態，而設定為土石流邊界條件¹⁶⁾。

河床堆積物係由該豪雨前所形成堆積物以及該豪雨引致崩土流出形成堆積物所構成。該豪雨之前形成的堆積物有可能在後續流水作用下細粒土砂流失。反之，該豪雨所形成堆積物可能含較多細粒土砂。土石流侵蝕時被帶入水流的細粒土砂運動過程會產生不同流相，若孔隙流體質量密度提高、固相體積濃度降低，對土石流運動能力會產生較大影響²⁰⁾。因此，河床堆積物細粒土砂的時空間變化評估相當重要。這部分一般認為可以動床水理學的多層模型²⁴⁾有效完成評估。

谷口等坡降較小地點形成固相的粗粒土砂（粗粒料）有時不會分布

到整個水流表面。此時溢流流體大部分由水與細粒土砂構成。粗粒土砂分布範圍（粒料流動層厚）則可由土石流構成規則推導出^{10),11)}。粗粒土砂質量守恆定律因此有必要考量這種現象予以修改。

防砂壩等土石流對策設施效益評估可適用水深平均控制方程式，但這種方程式可能不適用於防砂壩正上游地點的水流狀況。此時可權宜修正演算地點之空間配置⁷⁾，或另行設定堰堤溢流時的邊界條件等⁷⁾。

2. 分析模型

2.1. 分析模型概要

本分析模型主要說明降雨引致流域坡面發生飽和側滲流（以下稱為「滲流」）與表面流，以及這些流體流入河道而在河床堆積物不安定化作用下產生土石流並往下流動、發生土石流氾濫之現象。本分析模型係由地形演算模型、降雨逕流模式、土石流運動模式、土石流氾濫模式等輔助模型構成。這些輔助模型都各自應用了既有的研究成果。

圖 1 為地形演算模型。地形演算模型由流域地形演算模型（與）構成。流域地形演算模型由坡面系統（）及河道系統（）構成，有各自的降雨逕流模式及土石流運動模式之演算領域。坡面系統模型以直交座標劃分網格單元的方式呈現；河道系統則以連結相鄰周邊八個方向網格單元之中心線段呈現。河道上游端為具有大於某臨界值集水面積的網格單元，連結最陡坡方向下游側的網格單元一路來到下游端。河道之寬與深可從網格單元尺寸獨立出來進行設定。洪氾平原地形演算模型以等劃分之網格單元呈現。降雨逕流模式及土石流氾濫模式則以平面二維座標呈現；土石流運動模式以一維座標呈現。

降雨逕流模式係於平面二維坡面及其上段所設定之表土層，演算表土層之濕潤與乾燥、滲流及表面流之發生與流動過程¹⁷⁾。滲流及表面流各自適用達西定律（線性滲流定律）與曼寧公式。河道所設定網格單元之水深部分可以溢流公式²⁵⁾算出河道入流量，作為土石流運動模式的邊界條件。

土石流運動模式係針對以一維河道坡面滲流及表面流為邊界條件而演算伴隨土石流發生及侵蝕與堆積的運動過程。土石流之發生可針對河床堆積物，以無限長坡面之安定分析¹⁷⁾進行推估；坡面入流量不穩定時，該地點堆積物可能全部流動化。開始流動的堆積物可以土石流控制方程式^{10),11),18),19)}估算之。細粒土砂往流相遷移的現象對於土石流的形成以及規模大小決定機制影響很大^{20),16)}，因此質量守恆定律分別以固相的水流主體粗粒砂及與水同為流相運動的細粒土砂進行說明。土石流運動土石流表面高程大於地盤高程的地點，可利用溢流公式²⁵⁾算出土石流深度而估算土石流溢流量，並以此作為土石流氾濫演算模型之邊界條件。本分析模型主要說明如何以土石流沿河道往下運動過程中土石流的表面高程與流路側岸地盤高程決定土石流發生地點。

土石流氾濫模式係演算河道溢流之土石流氾濫過程。土石流控制方程式除了以平面二維座標呈現之外，與土石流運動模式的控制方程式相同。此外，演算領域可設定任意的形狀。

圖 2 為輔助模型之間的連續關係、輸出輸入項目以及設定項目。輸入項目為可能蒸發散量（可省略）、降雨數據及地形數據；設定項目則有土層與堆積層之水理、水文條件與粒徑。紅色箭頭代表輔助模型之間的連續狀況，降雨逕流演算模型與土石流運動演算模型之間從降雨逕流演算模型過渡到河道的滲流與表面流所形成的逕流量演算模型；土石流運動演算模型與土石流氾濫演算模型之間則從土石流運動演算模型過渡到氾濫平原的溢流量。

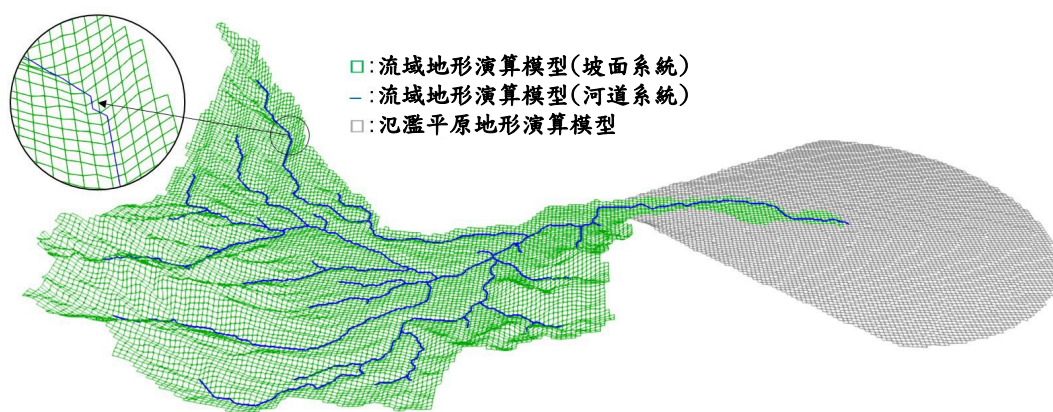


圖 1 地形演算模型模式圖

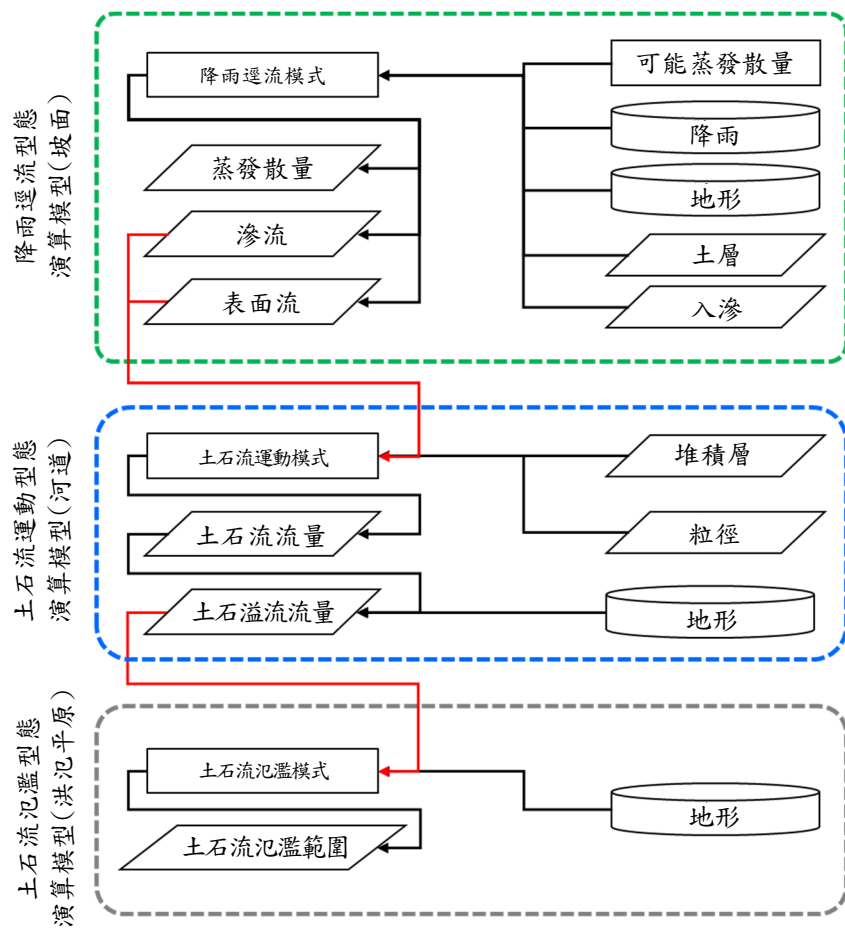


圖 2 輔助模型間的連接關係與輸出入項目、設定項目

2.2. 模型分割之目的

本分析模型分割為輔助模型係為提高演算處理效率。降雨逕流型態、土石流運動型態及土石流氾濫型態演算處理之特徵如下。

- 降雨逕流型態：演算領域廣，現象持續時間長
- 土石流運動型態：對象現象之逐時變化大
- 土石流氾濫型態：演算領域之空間解析度較高

上述三種型態以共通模型演算時，須呈現大面積區域高空間解析度，縮小時間刻度長時間持續演算，演算所消耗資源因此變大。本分析模型係以試誤法演算即時取得大概結果為目的，如上地提升演算效率。

2.3. 降雨逕流模式

降雨逕流模式係於平面二維坡面及其上段所設定之表土層，演算表土層之濕潤與乾燥、滲流及表面流發生與流動過程。圖3為坡面表土層及該處所形成滲流及表面流水面模式圖。此處的 z_s 及 z 為表土層下沿及表層高程， D 為表土層厚度， θ 為最陡坡度， f_{s1} 與 f_{s2} 為表層與表層到下層的入滲量， p_w 為表土層平均含水率， h_s 為滲流水深， h 為表面流水深。此坡面有了降雨 r 後表土層會因為雨水垂直移動而濕潤、 p_w 增加達到上限會產生滲流，滲流水深 h_s 達表土層厚 D 則形成表面流。降雨停止後蒸發散作用會減少滲流，表土層乾燥降低 p_w 。噴發後降灰對表土層透水性的影響會反映在 f_{s1} 上。土壤透水性依孔隙直徑分布、孔隙屈曲度以及孔隙彼此相連結的孔隙構造而定²⁶⁾，但本研究只簡單扼要以降灰厚度所取得的經驗函數說明 f_{s1} 。上述過程可進行如下模式化。

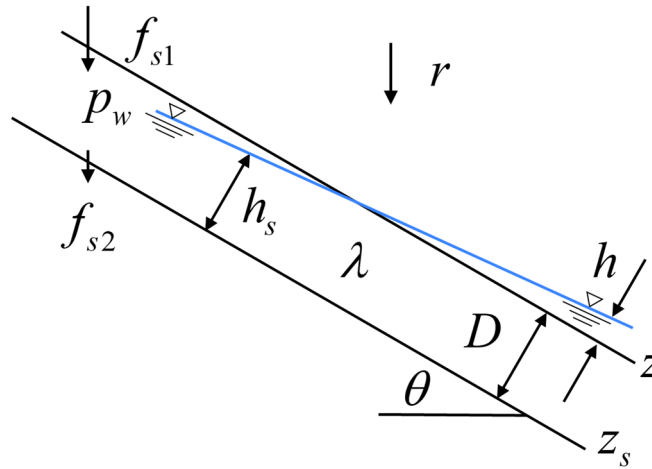


圖 3 坡面與水面之模式圖¹⁷⁾

2.3.1. 坡面滲流與洪水流控制方程式

表土層之含水率、滲流以及表面流之質量守恆定律如下公式所示¹⁷⁾。

$$\frac{\partial(p_w D)}{\partial t} = r - e \quad (1)$$

此處 p_w 為表土層含水率， e 為蒸發散強度。若 p_w 所取得的最大值為 p_{wc} ，同公式之 p_w 取得值為 $0 \leq p_w \leq p_{wc}$ ， $p_w = p_{wc}$ 時會形成飽和帶而產生滲流。一旦降雨停止，在蒸發散 e 作用之下會進入乾燥過程。

滲流及表面流的傳統研究常使用水深平均之二維控制方程式，滲流及表面流則分別適用達西定律與曼寧法則。

滲流的質量守恒定律如下¹⁷⁾。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{1}{\lambda - p_w} \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) = \frac{\cos \theta}{\lambda - p_w} (f_{s1} - f_{s2} - e) \quad (2)$$

在此 t 為時間， x 、 y 為直交直線座標， x - y 面為沿坡面之平面， λ 為表土層空隙率， q_{sx} 、 q_{sy} 分別是滲流通量 q_s 在 x 方向及 y 方向的分量， q_s 為最陡坡降方向之滲流通量。此外，降雨 r 低於表層入滲量 f_{s1} 亦即 $r < f_{s1}$ 時，表層之入滲強度相當於降雨量亦即 $f_{s1} = r$ 。火山地區則一般認為噴發帶來的降灰會降低入滲量。目前並無可呈現這種關聯性的可靠函數，權宜設定為 $f_{s1} = f_{s0}(1 - D_a/D_{a0})$ 。在此 f_{s0} 為降灰前的入滲量， D_a 為降灰厚度， D_{a0} 為入滲量變成0的降灰厚度。

滲流之能量守恒定律如下式所示¹⁷⁾。

$$q_{sx} = -\frac{\partial H}{\partial x} I^{-1} q_s \quad (3)$$

$$q_{sy} = -\frac{\partial H}{\partial y} I^{-1} q_s \quad (4)$$

$$q_s = khI \quad (5)$$

$$I = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2} \quad (6)$$

在此， H 為滲流或表面流之水位，因此， $H = z_s + h_s \cos \theta$ 或 $H = z + h \cos \theta$ ， I 為水面之最陡坡降， k 為飽和滲透係數（飽和時的水力傳導係數）。

表面流之質量守恆定律如下式所示¹⁷⁾。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = (r - f_{s2} - e) \cos \theta - \frac{2q_{sr}L}{\Delta x \Delta y} \quad (7)$$

在此， q_x 、 q_y 分別是表面流通量之在 x 方向及 y 方向之分量， q 為表面流通量， q_{sr} 為坡面進入河道的單位寬流量，若呈現負數代表河道往坡面之流量（後述）， L 為單位河道流動方向之長度，流動方向為 x 方向時 $L=\Delta x$ ， y 方向時 $L=\Delta y$ 。

表面流之能量守恆定律如下式所示¹⁷⁾。

$$q_x = -\frac{\partial H}{\partial x} I^{-1} q \quad (8)$$

$$q_y = -\frac{\partial H}{\partial y} I^{-1} q \quad (9)$$

$$q = \frac{1}{N} \sqrt{I} h^{5/3} \quad (10)$$

在此， N 為等價粗糙係數²⁵⁾。

2.3.2. 河道逕流量之計算方法

圖 4 為河道所設定之網格單元模式圖。河道水位低於網格單元之水位，代表水從網格單元流入河道。河道水位比網格單元水位還高時，代表水從河道往網格單元流動。 q_{sr} 為進入河道的單位寬流量，可用完全溢流公式²⁵⁾呈現之。

$$q_{sr} = \mu h \sqrt{2gh} \quad (11)$$

在此， μ 為常數，亦即 $\mu = 0.35$ ²⁵⁾， g 為重力加速度。

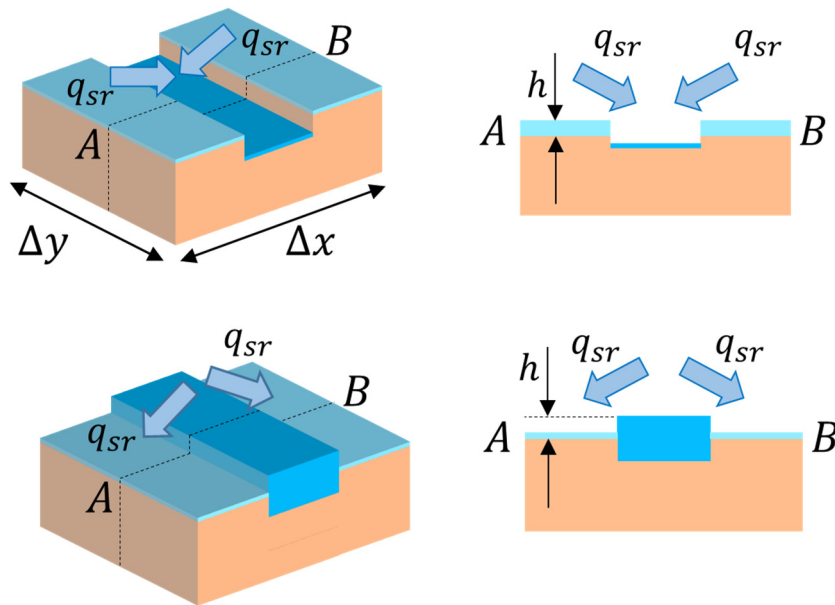


圖 4 水從坡面流進河道的流量（上：河道水位比網格單元水位還低時，
下：河道水位比網格單元水位還高時）

2.3.3. 河道洪水流之控制方程式

河道的洪水流質量守恆定律如下式所示。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial uhB}{\partial x} = \frac{2q_{sr}L}{BL} \quad (12)$$

在此， B 為河寬， L 為流動方向之長度。

洪水流之運動方程式可適用曼寧法則，如下式所示。

$$u = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\partial H}{\partial x}} h^{2/3} \quad (13)$$

在此， n 為曼寧粗糙係數。

2.3.4. 離散化

以前述圖 5 所示之控制方程式的變數配置進行上風（差分）法離散化。圖之 $s(\bullet)$ 、 $u(\triangleright)$ 、 $v(\triangle)$ 分別代表純量（無向量）、 x 方向之分量與 y 方向之分量。 $s(\bullet)$ 為體積含水率 p_w 、滲流水深 h_s 、表面流水深 h 、最陡坡降 I 、最陡坡降方向之滲流 q_s 及表面流 q 。 $u(\triangleright)$ 為滲流及代表滲流通量之 x 成分的 q_{sx} 、 q_x 。 $v(\triangle)$ 為滲流及表面流通量之 y 成分的 q_{sy} 、 q_y 。時刻及位置相關之括弧補充字 (t) 、 (i,j) 及其增分用 Δ 加以表示，無括弧補充字者視為該時刻 (t) 與位置 (i,j) 。 i 與 j 之範圍若為純量型的變數，分別是 $i=1$ 到 $i=iend$ 以及 $j=1$ 到 $j=jend$ ；若為向量型變數則分別是 $i=1$ 到 $i=iend+1$ 以及 $j=1$ 到 $j=jend+1$ 。邊界條件使用狄利克雷（dirichlet）邊界條件（第一種邊界條件）。

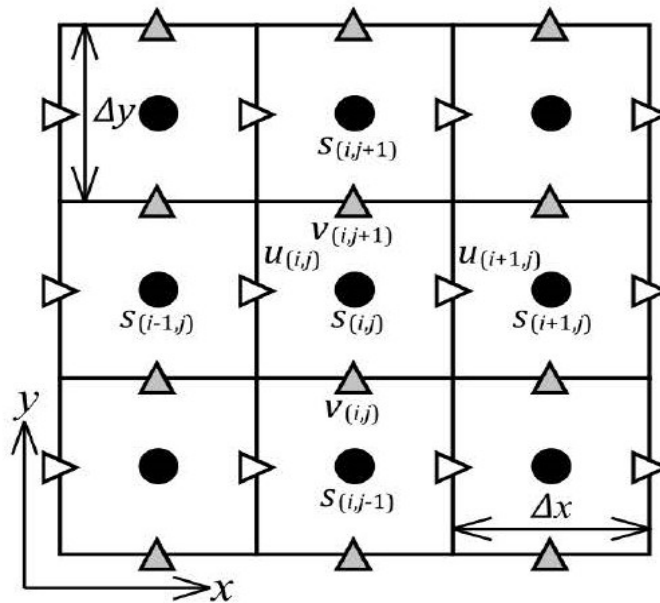


圖5 時刻 t 的變數配置圖

2.3.4.1 質量守恆定律及能量守恆定律的離散化

表土層的質量守恆定律進行離散化結果，如下式所示。

$$\frac{p_w^{(t+\Delta t)}D - p_w^{(t)}D}{\Delta t} = r(t) - e(t) \quad (14)$$

滲流之質量守恆定律離散化結果如下式所示。

$$\frac{h_s^{(t+\Delta t)} - h_s^{(t)}}{\Delta t} + \frac{1}{\lambda - p_w} \left(\frac{q_{sx(i+1,j)} - q_{sx(i,j)}}{\Delta x} + \frac{q_{sy(i,j+1)} - q_{sy(i,j)}}{\Delta y} \right) = \frac{\cos \theta}{\lambda - p_w} (f_{s1} - f_{s2} - e) \quad (15)$$

應用達西定律所評估最陡坡降方向滲流之在x方向及y方向之分量分別如下式所示，相當類似。

$$\begin{aligned} q_{sx(i,j)} &= -k_{(i-1,j)} h_{(i-1,j)} \frac{H_{(i,j)} - H_{(i-1,j)}}{\Delta x} & 0 \leq \frac{H_{(i,j)} - H_{(i-1,j)}}{\Delta x} \\ q_{sx(i,j)} &= -k_{(i,j)} h_{(i,j)} \frac{H_{(i,j)} - H_{(i-1,j)}}{\Delta x} & \frac{H_{(i,j)} - H_{(i-1,j)}}{\Delta x} < 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} q_{sy(i,j)} &= -k_{(i,j-1)} h_{(i,j-1)} \frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{\Delta y} & 0 \leq \frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{\Delta y} \\ q_{sy(i,j)} &= -k_{(i,j)} h_{(i,j)} \frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{\Delta y} & \frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{\Delta y} < 0 \end{aligned} \quad (17)$$

表面流的質量守恆定律離散化結果，如下式所示。

$$\frac{h^{(t+\Delta t)} - h^{(t)}}{\Delta t} + \left(\frac{q_{x(i+1,j)} - q_{x(i,j)}}{\Delta x} + \frac{q_{y(i,j+1)} - q_{y(i,j)}}{\Delta y} \right) = (r - f_{s2} - e) \cos \theta \quad (18)$$

應用曼寧法則所評估之最陡坡降方向表面流之在 x 方向及 y 方向之分量分別如下式所示，相當類似。

$$q_{x(i,j)} = \frac{-1}{N_{(i-1,j)}} \sqrt{\frac{H_{(i,j)} - H_{(i-1,j)}}{\Delta x}} h_{(i-1,j)}^{5/3} \quad 0 \leq \frac{H_{(i,j)} - H_{(i-1,j)}}{\Delta x} \quad (19)$$

$$q_{x(i,j)} = \frac{1}{N_{(i,j)}} \sqrt{\left| \frac{H_{(i,j)} - H_{(i-1,j)}}{\Delta x} \right|} h_{(i,j)}^{5/3} \quad \frac{H_{(i,j)} - H_{(i-1,j)}}{\Delta x} < 0$$

$$q_{y(i,j)} = \frac{-1}{N_{(i,j-1)}} \sqrt{\frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{\Delta y}} h_{(i,j-1)}^{5/3} \quad 0 \leq \frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{\Delta y} \quad (20)$$

$$q_{y(i,j)} = \frac{1}{N_{(i,j)}} \sqrt{\left| \frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{\Delta y} \right|} h_{(i,j)}^{5/3} \quad \frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{\Delta y} < 0$$

2.3.4.2. 邊界條件

開始演算時刻 $t=0$ 之各變數值稱為初期條件或初值。此外， $i=1, i=iend, j=1, j=jend$ 各變數值稱為邊界條件或邊值。邊界條件應用狄利克雷邊界條件。滲流之邊值如下式所示。

$$q_{sx(1,j)} = -k_{(1,j)} h_{(1,j)} \frac{H_{(2,j)} - H_{(1,j)}}{\Delta x} \quad (21)$$

$$q_{sx(iend+1,j)} = -k_{(iend,j)} h_{(iend,j)} \frac{H_{(iend,j)} - H_{(iend-1,j)}}{\Delta x} \quad (22)$$

$$q_{sy(i,1)} = -k_{(i,1)}h_{(i,1)}\frac{H_{(i,2)} - H_{(i,1)}}{\Delta y} \quad (23)$$

$$q_{sy(i,jend+1)} = -k_{(i,jend)}h_{(i,jend)}\frac{H_{(i,jend)} - H_{(i,jend-1)}}{\Delta y} \quad (24)$$

表面流所改變的只有公式的變數，所採用變數的空間關係則相同。此外如後述，河道洪水流的演算方法方面，所採用變數的空間關係與土石流運動模式相同。

2.4. 土石流運動模式

土石流運動模式係於一維河道，以坡面滲流及表面流為邊界條件而演算土石流之發生，以及侵蝕、堆積伴隨產生的土砂運動過程。土石流之發生若河床堆積物適用無限長坡面之安定分析¹⁷⁾而自坡面入流量變成不安定，該地點堆積物之全層應會流動化。流動化的堆積物可使用土石流的控制方程式^{10),11),18),19)}。土石流形成與規模大小決定機制上扮演重要角色的細粒土砂往流體遷移現象^{20),16)}須納入考量，質量守恆定律因此區分固體支配水流的粗粒土砂以及和水同以流體運動的細粒土砂，說明如下。

河床堆積物係由各種粒徑之土砂顆粒構成。這些土砂粒子大於常數臨界值者為粗粒土砂，小於臨界值者為細粒土砂。圖6說明堆積物粗粒土砂與細粒土砂之靜止、流動化及堆積狀況。粗粒土砂及細粒土砂含有率分別為 p_c 及 p_f ($p_c + p_f = 1$)，堆積物體積濃度為 c_* ，則粗粒土砂及細粒土砂分別標示為 $p_c c_*$ 及 $p_f c_*$ 。堆積物因水飽和開始運動化時，細粒土砂會往流體遷移並與水一起形成孔隙流體，但只有粗粒土砂形成固體。此時粗粒土砂之體積濃度 $c_c = p_c c_*$ ，流體相之細粒土砂體積濃度 $c_f = p_f c_*/(1 - c_c)$ 。堆積時粗粒土砂之間所形成堆積物空隙會吸入水與細粒土砂所構成的孔隙流體。此時進入孔隙的粗粒土砂與細粒土砂合計土砂體積濃度為 $c_{*D} = c_* + (1 - c_*)c_f$ 。

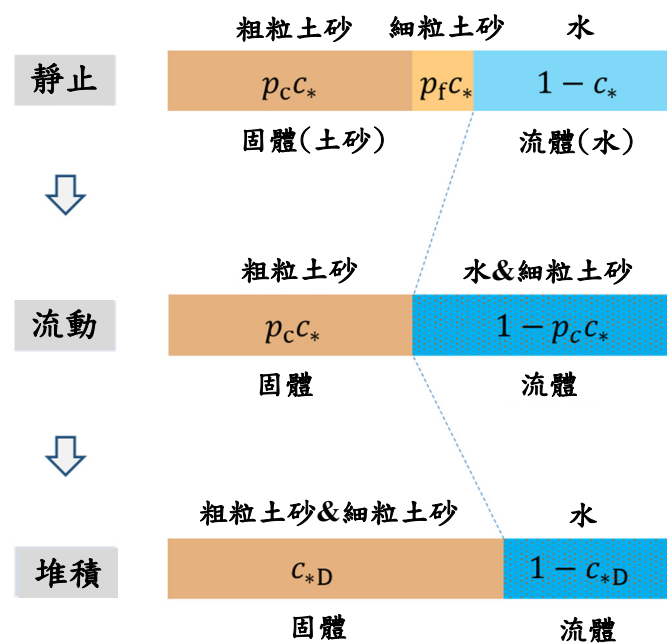


圖 6 堆積物之靜止、流動化及堆積時的狀態¹⁷⁾

2.4.1. 河床堆積物之安定條件

已形成表面流或滲流時，利用無限長坡面之平衡條件判定崩塌是否會發生。此時沿坡面之重力成分 G 若由作用在表土層、滲流及表面流的重力流動方向成分構成，阻力 R 由庫倫摩擦及流體黏滯力構成，可以下式說明¹⁷⁾。

$$G = pgD \sin \theta \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} \right) c_* + \left(1 - \frac{h_s}{D} \right) p_w + \left(\frac{h_s}{D} \right) (1 - c_*) + \frac{h}{D} \right\} \quad (25)$$

$$R = pgD \cos \theta \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} \right) c_* + \left(1 - \frac{h_s}{D} \right) p_w - \left(\frac{h_s}{D} \right) c_* \right\} \tan \phi + c \quad (26)$$

此處 σ 為土砂顆粒之質量密度， g 為重力加速度， ρ 為水的質量密度， c_* 為表土層的體積土砂濃度， D 土砂厚度， ϕ 為內摩擦角， c 為表土層及其下層邊界之黏滯力。上式可看出滲流所產生浮力會降低有效應力。崩塌之發生臨界條件 $G = R$ 如下式所示¹⁷⁾。

$$\tan \theta_c = \frac{\left(\frac{\sigma}{\rho} - \frac{h_s}{D} \right) c_* + \left(1 - \frac{h_s}{D} \right) p_w + c'}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - \frac{h_s}{D} \right) c_* + \frac{(h_s + h)}{D} + \left(1 - \frac{h_s}{D} \right) p_w} \tan \phi \quad (27)$$

在此， θ_c 為崩塌發生之臨界坡度， c' 黏滯力之無因次量， $c' = c/(\rho g D \cos \theta \tan \phi)$ 。 $\theta_c < \theta$ 的領域判定會發生崩塌。崩塌發生時堆積物會全層流動化。

河床堆積物係由非黏著性物質所構成，含水飽和時的狀況如下式所示。

$$\tan \theta_c = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_*}{(\sigma/\rho - 1)c_* + (1 + h/D)} \tan \phi \quad (28)$$

2.4.2. 土石流之控制方程式

2.4.2.1. 質量守恆定律

分析模型需要瞭解細粒土砂往流體相遷移之後的孔隙流體質量密度，因此有必要以質量設定遷移到流體相的細粒土砂。以一維說明土石流整體、粗粒土砂及細粒土砂之質量守恆定律^{18),19)}的深度平均，如下式所示。

侵蝕過程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial uhB}{\partial x} = \frac{E}{c_*} + f_{in} - f_{out} \quad (29)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial \gamma c_c uhB}{\partial x} = p_c E - c_c f_{out} \quad (30)$$

$$\frac{\partial c_f(1 - c_c)h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial c_f(1 - c_c)uhB}{\partial x} = p_f E - (1 - c_c)c_f f_{out} \quad (31)$$

堆積過程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial uhB}{\partial x} = \frac{E}{c_*} + f_{in} - f_{out} \quad (32)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial \gamma c_c uhB}{\partial x} = E - c_c f_{out} \quad (33)$$

$$\frac{\partial c_f(1 - c_c)h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial c_f(1 - c_c)uhB}{\partial x} = (1/c_* - 1)c_f E - (1 - c_c)c_f f_{out} \quad (34)$$

在此， h 為流動深度， t 為時間， B 為河寬， x 為沿河床的軸， u 為 x 軸方向的水深平均流速， E 為侵蝕與堆積速度， c_* 為河床堆積物之靜止體積濃度， f_{in} 為從流域坡面的河道入流量， f_{out} 為河道溢流量（成為後述氾濫模式之邊界條件）， c_c 為粗粒土砂之水深平均體積濃度， γ 為輸砂校正係數， c_f 為流體相細粒土砂體積濃度， c_{*D} 為堆積過程粗粒土砂之靜止體積濃度。侵蝕與堆積速度如下式所示¹¹⁾。

$$\frac{E}{u} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (35)$$

在此， θ 為河床坡降， θ_e 為土石流的平衡坡降，如下式所示¹¹⁾。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_c}{(\sigma/\rho - 1)c_c + 1} \tan \phi \quad (36)$$

在此， σ 為砂礫質量密度， ρ 為孔隙流體質量密度， ϕ 則是砂礫內摩擦角。平衡公式之孔隙流體質量密度 ρ 可用流體相細粒土砂濃度 c_f 說明，如下式所示。

$$\rho = (\sigma - \rho_w)c_f + \rho_w \quad (37)$$

在此， ρ_w 為水的質量密度。因此，細粒土砂往流體相遷移會增加孔隙流體密度。以上二式細粒土砂含有率 p_f 增加時，孔隙流體密度 ρ 跟著增加，粗粒土砂濃度 c_c 則減少，使得平衡坡度 θ_e 變小。

河床堆積物的質量守恆定律如下式所示。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{E}{c_* \cos \theta} \quad (38)$$

在此， z 為河床高程。

2.4.2.2. 能量守恆定律

土石流能量守恆定律可用平均一維說明其深度，如下式所示。

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial \beta uuhB}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_m} \quad (39)$$

在此， β 為動能校正係數， H 為土石流流體表面位置，可用 $H = z + h \cos \theta$ 說明； ρ_m 為土石流質量密度， τ_b 為河床剪力¹⁰⁾，如下式所示。

$$\tau_b = \tau_y + \rho f_b u^2 \quad (40)$$

在此， τ_y 為庫倫力型降伏應力， f_b 為流阻係數。這些數字的相關公式如下。

$$\tau_y = \left(\frac{c_c}{c_w}\right)^{1/5} (\sigma - \rho) c_c g h \cos \theta \tan \phi \quad (41)$$

$$f_b = \frac{25}{4} (f_d + f_f) \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \quad (42)$$

$$f_d = k_d \left(\frac{\sigma}{\rho}\right) (1 - e^2) c_c^{1/3} \quad (43)$$

$$f_f = k_f (1 - c_c)^{5/3} c_c^{-2/3} \quad (44)$$

在此 d 為粗粒土砂之代表粒徑， k_f 、 k_d 為常數，分別形成 $k_f=0.16^{10)}$ 、 $k_d=0.0828^{10)}$ ， e 為砂礫間的恢復係數。坡降較小領域或粒徑較小時，推估粒子流動層上段所形成亂流層會產生優勢影響，因此參考與 f_b 實測值²⁷⁾，以下式²⁸⁾評估 f_b ，若比式(42)所產生 f_b 值還大，採用此值。

$$f_b = \left(A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{\kappa_s}\right)^{-2} \quad (45)$$

在此， A_r 為常數， κ 為卡門常數， κ_s 是相對粗糙度，暫時採 $A_r=8.5^{28)}$ 、 $\kappa=0.4^{28)}$ 、 $\kappa_s=d^{19)}$ 。

2.4.3. 土石流溢水量之計算方法

土石流流動過程土石流表面高程大於地盤高程的地點，於適當土石流深度地點使用溢流公式²⁵⁾算出土石流溢流量，並作為土石流氾濫型態模型之邊界條件。本分析模型乃是針對土石流沿河道往下運動的過程，以土石流表面高程以及流入側岸地盤高程，判定土石流氾濫發生地點。圖7為土石流由河道往洪氾平原溢流的模式圖。土石流溢流時的單位寬之溢流量，大致以下式²⁵⁾進行評估。

$$q_{sr} = \mu h \sqrt{2gh} \quad (46)$$

在此 μ 為常數， $\mu=0.35^{25)}$ ， g 為重力加速度。此外，溢流土石流會在洪氾平原流動，不會再度流入河道。

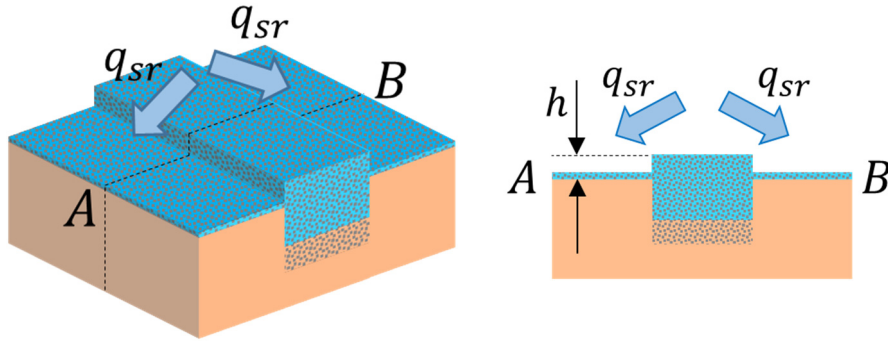


圖 7 土石流之溢流

2.4.4. 離散化

以前述圖 8 所示控制方程式的變數配置進行上風（差分）法離散化。圖中 s 與 u 分別代表通量與 x 方向之向量。 s 代表水深 h 、粗粒土砂濃度 c_c 與細粒土砂濃度 c_f ， u 代表流速。時刻及位置相關之括弧補充字 (t) 、 (i) 及其增分以 Δ 標示，無括弧補充字者視為該時刻 (t) 與位置 (i) 。

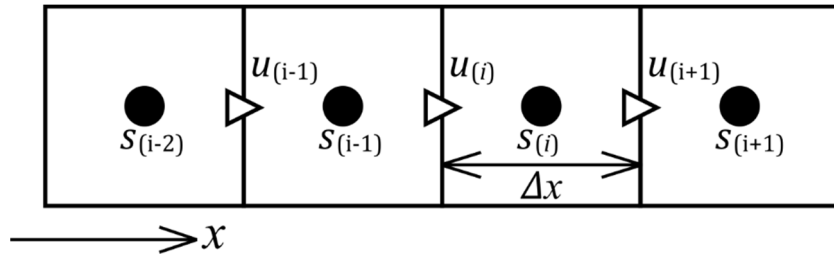


圖 8 變數配置圖

2.4.4.1. 質量守恆定律

土石流整體、粗粒土砂及細粒土砂之質量守恆定律之侵蝕過程進行離散化，可得到以下結果。

土石流整體的質量守恆定律(29)離散化結果如下式所示。

$$\frac{h^{(t+\Delta t)} - h^{(t)}}{\Delta t} + \frac{1}{B} \frac{M_{(i+1)} - M_{(i)}}{\Delta x} = \frac{E}{c_*} + f_{in} - f_{out} \quad (47)$$

在此， M 為 u 位置的水與土砂全流量，如下式所示。

$$\begin{aligned} M_{(i)} &= u_{(i)} h_{(i-1)} B_{(i-1)} & 0 \leq u_{(i)} \\ M_{(i)} &= u_{(i)} h_{(i)} B_{(i)} & u_{(i)} < 0 \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} M_{(i+1)} &= u_{(i+1)} h_{(i)} B_{(i)} & 0 \leq u_{(i+1)} \\ M_{(i+1)} &= u_{(i+1)} h_{(i+1)} B_{(i+1)} & u_{(i+1)} < 0 \end{aligned} \quad (49)$$

粗粒土砂的質量守恆定律(30)離散化結果如下式所示。

$$\frac{c_c^{(t+\Delta t)} h^{(t+\Delta t)} - c_c^{(t)} h^{(t)}}{\Delta t} + \frac{1}{B} \frac{M_{(i+1)} - M_{(i)}}{\Delta x} = p_c E - c_c f_{out} \quad (50)$$

在此， M 為 u 位置所定義的粗粒土砂全流量，如下式所示。

$$\begin{aligned} M_{(i)} &= \gamma_{(i-1)} c_{c(i-1)} u_{(i)} h_{(i-1)} B_{(i-1)} & 0 \leq u_{(i)} \\ M_{(i)} &= \gamma_{(i)} c_{c(i)} u_{(i)} h_{(i)} B_{(i)} & u_{(i)} < 0 \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} M_{(i+1)} &= \gamma_{(i)} c_{c(i)} u_{(i+1)} h_{(i)} B_{(i)} & 0 \leq u_{(i+1)} \\ M_{(i+1)} &= \gamma_{(i+1)} c_{c(i-1)} u_{(i+1)} h_{(i+1)} B_{(i+1)} & u_{(i+1)} < 0 \end{aligned} \quad (52)$$

應設定 $h^{(t+\Delta t)}$ 為已知，但程式之演算程序這部分須先演算，可視為接近 $t+\Delta t$ 。

細粒土砂之質量守恆定律(31)離散化結果如下式所示。

$$\begin{aligned} & \frac{c_f^{(t+\Delta t)} (1 - c_c^{(t+\Delta t)}) h^{(t+\Delta t)} - c_f^{(t)} (1 - c_c^{(t)}) h^{(t)}}{\Delta t} + \frac{1}{B} \frac{M_{(i+1)} - M_{(i)}}{\Delta x} \\ & = p_f E - (1 - c_c) c_f f_{out} \end{aligned} \quad (53)$$

在此， M 為 u 位置所定義的細粒土砂全流量，如下式所示。

$$\begin{aligned} M_{(i)} &= c_{f(i-1)}(1 - c_{c(i-1)})u_{(i)}h_{(i-1)}B_{(i-1)} & 0 \leq u_{(i)} \\ M_{(i)} &= c_{f(i)}(1 - c_{c(i)})u_{(i)}h_{(i)}B_{(i)} & u_{(i)} < 0 \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} M_{(i+1)} &= c_{f(i)}(1 - c_{c(i)})u_{(i+1)}h_{(i)}B_{(i)} & 0 \leq u_{(i+1)} \\ M_{(i+1)} &= c_{f(i+1)}(1 - c_{c(i+1)})u_{(i+1)}h_{(i+1)}B_{(i+1)} & u_{(i+1)} < 0 \end{aligned} \quad (55)$$

以上即使土石流整體、粗粒土砂及細粒土砂質量守恆定律之堆積過程離散化，左邊仍相同。

河床堆積物的質量守恆定律離散化結果如下式所示。

$$\frac{z^{(t+\Delta t)} - z^{(t)}}{\Delta t} = -\frac{E}{c_* \cos \theta} \quad (56)$$

2.4.4.2. 滙流點之計算方法

滙流狀況可用式(48)、(51)、(54)之 $M(i)$ 予以探討。圖9為主流與支流滙流點的變數配置。本分析係於滙流點將擁有較大集水面積的河道視為主流，其餘河道視為支流。在此，主流及支流的括弧補充字分別為 m 與 t 。以式(48)為例， $M(i)$ 如下式所示。

$$\begin{aligned} M_{(i)} &= u_{(i_m)}h_{(i_m-1)}B_{(i_m-1)} + u_{(i_t)}h_{(i_m)}B_{(i_m)} & 0 \leq u_{(i_m)} & \quad 0 \leq u_{(i_t)} \\ M_{(i)} &= u_{(i_m)}h_{(i_m-1)}B_{(i_m-1)} + u_{(i_t)}h_{(i_t-1)}B_{(i_t-1)} & 0 \leq u_{(i_m)} & \quad u_{(i_t)} < 0 \\ M_{(i)} &= u_{(i_m)}h_{(i_m)}B_{(i_m)} + u_{(i_t)}h_{(i_t-1)}B_{(i_t-1)} & u_{(i_m)} < 0 & \quad 0 \leq u_{(i_t)} \\ M_{(i)} &= u_{(i_m)}h_{(i_m)}B_{(i_m)} + u_{(i_t)}h_{(i_m)}B_{(i_m)} & u_{(i_m)} < 0 & \quad u_{(i_t)} < 0 \end{aligned} \quad (57)$$

這部分的粗粒土砂與細粒土砂連續條件仍相同。此外，逆流時只設定主流產生逆流。

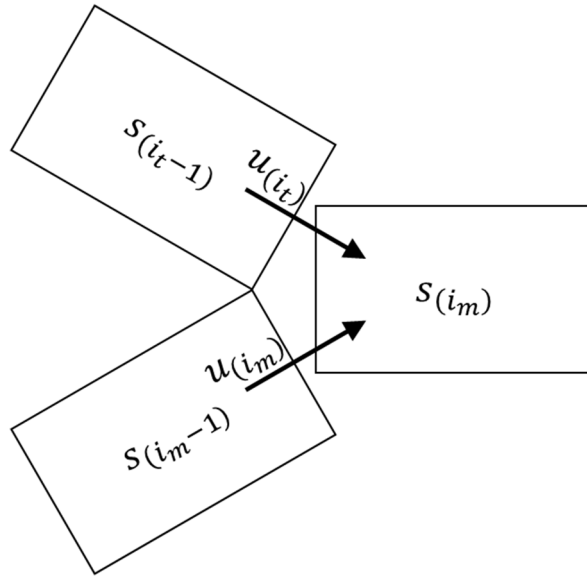


圖 9 滙流點的變數配置圖

2.4.4.3. 動能守恆定律

動能守恆定律(39)左邊第二項及右邊第一項分別設定為 X 與 Y ，離散化結果如下式所示。

$0 \leq u_{(i)}$ 時，如下式所示。

$$\frac{u_{(i)}^{(t+\Delta t)} h_{(i-1)}^{(t+\Delta t)} - u_{(i)}^{(t)} h_{(i-1)}^{(t)}}{\Delta t} + X = -Y - \frac{\tau_{y(i-1)} + \rho_{(i-1)} f_{b(i-1)} u_{(i)}^{(t+\Delta t)} |u_{(i)}^{(t)}|}{\rho_{m(i-1)}} \quad (58)$$

在此，右邊第二項須進行Vasiliev不安定回避²⁹⁾，因此使用 $u_{(i)}^{(t+\Delta t)}$ 。應設定 $h_{(i-1)}^{(t+\Delta t)}$ 為已知，因此按照程式的演算順序先進行演算，大致設定值為 $t + \Delta t$ 。

X 如下式所示。

$$X = u_{(i)} \frac{1}{B_{(i-1)}} \frac{M_{(i)} - M_{(i-1)}}{\Delta x} \quad (59)$$

在此， M 為 u 的位置所定義之水及土砂全流量，如下式所示。

$$M_{(i)} = \beta_{(i-1)} u_{(i)} h_{(i-1)} B_{(i-1)} \quad 0 \leq u_{(i)} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} M_{(i-1)} &= \beta_{(i-2)} u_{(i-1)} h_{(i-2)} B_{(i-2)} & 0 \leq u_{(i-1)} \\ M_{(i-1)} &= \beta_{(i-1)} u_{(i-1)} h_{(i-1)} B_{(i-1)} & u_{(i-1)} < 0 \end{aligned} \quad (61)$$

Y 如下式所示。

$$Y = gh_{(i-1)} \frac{H_{(i)} - H_{(i-1)}}{\Delta x} \quad (62)$$

$u_{(i)} < 0$ 時，如下式所示。

$$\frac{u_{(i)}^{(t+\Delta t)} h_{(i)}^{(t+\Delta t)} - u_{(i)}^{(t)} h_{(i)}^{(t)}}{\Delta t} + X = -Y - \frac{\tau_{y(i)} + \rho_{(i)} f_{b(i)} u_{(i)}^{(t+\Delta t)} |u_{(i)}^{(t)}|}{\rho_{m(i)}} \quad (63)$$

X 如下式所示。

$$X = u_{(i)} \frac{1}{B_{(i)}} \frac{M_{(i+1)} - M_{(i)}}{\Delta x} \quad (64)$$

在此， M 為 u 位置所定義的水及土砂全流量，如下式所示。

$$\begin{aligned} M_{(i+1)} &= \beta_{(i)} u_{(i+1)} h_{(i)} B_{(i)} & 0 \leq u_{(i+1)} \\ M_{(i+1)} &= \beta_{(i+1)} u_{(i+1)} h_{(i+1)} B_{(i+1)} & u_{(i+1)} < 0 \end{aligned} \quad (65)$$

$$M_{(i)} = \beta_{(i)} u_{(i)} h_{(i)} B_{(i)} \quad u_{(i)} < 0 \quad (66)$$

Y 如下式所示。

$$Y = gh_{(i)} \frac{H_{(i)} - H_{(i-1)}}{\Delta x} \quad (67)$$

滙流點只有 $0 \leq u_{(i)}$ 且 $0 \leq u_{(i-1)}$ 時才進行與式(57)相同的演算，其他情況只有主流會出現逆流。

2.5. 土石流氾濫模式

土石流氾濫模式係演算河道溢流之土石流氾濫過程。土石流控制方程式除了以平面二維座標呈現外，與土石流運動模式的控制方程式大致相同。

2.5.1. 土石流之控制方程式

土石流整體、粗粒土砂、細粒土砂及河床堆積物的質量守恒定律^{18),19)}侵蝕過程，如下式所示。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{E}{c_*} + f_{df} \quad (68)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial \gamma c_c uh}{\partial x} + \frac{\partial c_c vh}{\partial y} = p_c E + f_{cc} \quad (69)$$

$$\frac{\partial c_f(1-c_c)h}{\partial t} + \frac{\partial c_f(1-c_c)uh}{\partial x} + \frac{\partial c_f(1-c_c)vh}{\partial y} = p_f E + f_{cf} \quad (70)$$

堆積過程如下式所示。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{E}{c_{*D}} + f_{df} \quad (71)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial \gamma c_c uh}{\partial x} + \frac{\partial c_c vh}{\partial y} = E + f_{cc} \quad (72)$$

$$\frac{\partial c_f(1-c_c)h}{\partial t} + \frac{\partial c_f(1-c_c)uh}{\partial x} + \frac{\partial c_f(1-c_c)vh}{\partial y} = (1/c_* - 1)c_f E + f_{cf} \quad (73)$$

在此， h 為流動深度， t 為時間， x 與 y 為笛卡兒座標系， x - y 平面與水深平均流速向量形成的面一致， u 為 x 軸方向水深平均流速， v 為 y 軸方向水深平均流速， E 為侵蝕與堆積速度， c_* 為河床堆積物靜止體積濃度， f_{df} 為河道往洪氾平原的土石流溢流， c_c 為粗粒土砂水深平均體積濃度， γ 為輸砂校正係數， f_{cc} 為河道往洪氾平原的土石流粗粒土砂溢流， c_f 為流體相細粒土砂體積濃度， c_{*D} 為堆積過程粗粒土砂靜止體積濃度， f_{cf} 為河道往洪氾平原的土石流細粒土砂之溢流。侵蝕與堆積速度如下式所示¹¹⁾。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (74)$$

在此， θ 為土石流流速向量與水平面所構成的角， θ_e 為平衡坡降，分別如下式所示。

$$\tan \theta = \left(-\frac{\partial z}{\partial x} u - \frac{\partial z}{\partial y} v \right) \frac{1}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (75)$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_c}{(\sigma/\rho - 1)c_c + 1} \tan \phi \quad (76)$$

此處的 σ 為砂礫質量密度， ρ 為孔隙流體質量密度，如下式所示。

$$\rho = (\sigma - \rho_w)c_f + \rho_w \quad (77)$$

動能守恆定律如下式所示。

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial \beta uuh}{\partial x} + \frac{\partial \beta vuh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (78)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial \beta uvh}{\partial x} + \frac{\partial \beta vvh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (79)$$

此處 β 為動能校正係數， H 為土石流流體表面位置， τ_{bx} 與 τ_{by} 分別代表河床剪力 $\tau_b^{10)}$ 之 x 、 y 方向成分， ρ_m 為土石流的質量密度，如下式所示。

$$\rho_m = (\sigma - \rho)c_c + \rho \quad (80)$$

河床剪力 τ_b 及其 x 、 y 方向成分 τ_{bx} 、 τ_{by} 分別如下式所示。

$$\tau_{bx} = \frac{\tau_b u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (81)$$

$$\tau_{by} = \frac{\tau_b v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (82)$$

$$\tau_b = \tau_y + \rho f_b(u^2 + v^2) \quad (83)$$

此處的 τ_y 為庫倫力型降伏應力， f_b 為流體阻力係數，分別得到下式。

$$\tau_y = \left(\frac{c_c}{c_*}\right)^{1/5} (\sigma - \rho) c_c g h \cos \theta \tan \phi \quad (84)$$

$$f_b = \frac{25}{4} (f_d + f_f) \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \quad (85)$$

$$f_d = k_d (\sigma / \rho) (1 - e^2) c_c^{1/3} \quad (86)$$

$$f_f = k_f (1 - c_c)^{5/3} c_c^{-2/3} \quad (87)$$

此處 d 為粗粒土砂粒徑， $k_f = 0.16$ 、 $k_i = 0.0828$ 、 e 為砂礫恢復係數。坡降較小領域或粒徑較小時推估粒子流動層上部所形成亂流層會有優勢影響，參考 f_b 相關實測值²⁷⁾並以下式²⁸⁾評估 f_b ，若比式(85)所得到的 f_b 值還大，採用此值。

$$f_b = \left(A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{\kappa_s}\right)^{-2} \quad (88)$$

此處 A_r 為常數， κ 為卡門常數， κ_s 則是相當粗糙度，因此目前先採用 $A_s = 8.5$ ²⁸⁾、 $\kappa = 0.4$ ²⁸⁾、 $\kappa_s = d$ ¹⁹⁾。

2.5.2. 離散化

以圖10所示變數配置並利用上風差分法進行前述控制方程式之離散化。圖中 s 、 u 、 v 分別代表通量、 x 方向向量與 y 方向向量。 s 代表水深 h 、粗粒土砂濃度 c_c 、輸砂校正係數 y 與細砂土砂濃度 c_f ， u 與 v 代表流速。時刻及位置相關之括弧補充字(t)、(i,j)及其增分用 Δ 標示，無括弧補充字者視為該時刻(t)與位置(i,j)。

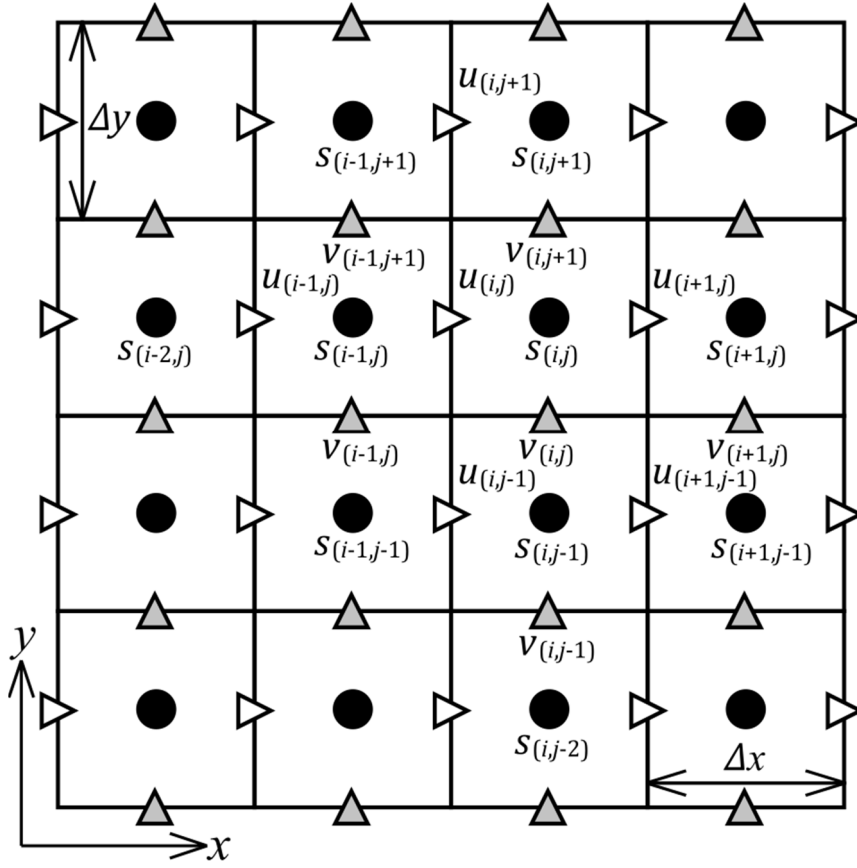


圖 10 變數配置圖

2.5.2.1. 質量守恆定律

土石流整體、粗粒土砂及細粒土砂質量守恆定律的侵蝕過程離散化結果如下所示。土石流整體質量守恆定律(68)離散化結果如下表所示。

$$\frac{h^{(t+\Delta t)} - h^{(t)}}{\Delta t} + \frac{M_{(i+1,j)} - M_{(i,j)}}{\Delta x} + \frac{N_{(i,j+1)} - N_{(i,j)}}{\Delta y} = \frac{E}{c_*} + f_{df} \quad (89)$$

此處 M 為 u 位置水與土砂的全流量， N 為 v 位置的水與土砂全流量，如下式所示。

$$\begin{aligned} M_{(i,j)} &= u_{(i,j)} h_{(i-1,j)} & 0 \leq u_{(i,j)} \\ M_{(i,j)} &= u_{(i,j)} h_{(i,j)} & u_{(i,j)} < 0 \end{aligned} \quad (90)$$

$$\begin{aligned} M_{(i+1,j)} &= u_{(i+1,j)} h_{(i,j)} & 0 \leq u_{(i+1,j)} \\ M_{(i+1,j)} &= u_{(i+1,j)} h_{(i+1,j)} & u_{(i+1,j)} < 0 \end{aligned} \quad (91)$$

$$\begin{aligned} N_{(i,j)} &= v_{(i,j)} h_{(i,j-1)} & 0 \leq v_{(i,j)} \end{aligned} \quad (92)$$

$$\begin{aligned}
N_{(i,j)} &= v_{(i,j)} h_{(i,j)} & v_{(i,j)} < 0 \\
N_{(i,j+1)} &= v_{(i,j+1)} h_{(i,j)} & 0 \leq v_{(i,j+1)} \\
N_{(i,j+1)} &= v_{(i,j+1)} h_{(i,j+1)} & v_{(i,j+1)} < 0
\end{aligned} \tag{93}$$

粗粒土砂的質量守恆定律(69)離散化如下式所示。

$$\frac{c_c^{(t+\Delta t)} h^{(t+\Delta t)} - c_c^{(t)} h^{(t)}}{\Delta t} + \frac{M_{(i+1,j)} - M_{(i,j)}}{\Delta x} + \frac{N_{(i,j+1)} - N_{(i,j)}}{\Delta y} = p_c E + f_{cc} \tag{94}$$

此處 M 為 u 位置的粗粒土砂之全流量， N 為 v 位置的粗粒土砂全流量，如下式所示。

$$M_{(i,j)} = c_c(i-1,j) \gamma_{(i-1,j)} u_{(i,j)} h_{(i-1,j)} \quad 0 \leq u_{(i,j)} \tag{95}$$

$$M_{(i,j)} = c_c(i,j) \gamma_{(i,j)} u_{(i,j)} h_{(i,j)} \quad u_{(i,j)} < 0$$

$$M_{(i+1,j)} = c_c(i,j) \gamma_{(i,j)} u_{(i+1,j)} h_{(i,j)} \quad 0 \leq u_{(i+1,j)}$$

$$M_{(i+1,j)} = c_c(i+1,j) \gamma_{(i+1,j)} u_{(i+1,j)} h_{(i+1,j)} \quad u_{(i+1,j)} < 0 \tag{96}$$

$$N_{(i,j)} = c_c(i,j-1) \gamma_{(i,j-1)} v_{(i,j)} h_{(i,j-1)} \quad 0 \leq v_{(i,j)}$$

$$N_{(i,j)} = c_c(i,j) \gamma_{(i,j)} v_{(i,j)} h_{(i,j)} \quad v_{(i,j)} < 0 \tag{97}$$

$$N_{(i,j+1)} = c_c(i,j) \gamma_{(i,j)} v_{(i,j+1)} h_{(i,j)} \quad 0 \leq v_{(i,j+1)}$$

$$N_{(i,j+1)} = c_c(i,j+1) \gamma_{(i,j+1)} v_{(i,j+1)} h_{(i,j+1)} \quad v_{(i,j+1)} < 0 \tag{98}$$

應設定 $h^{(t+\Delta t)}$ 為已知，但依程式的演算順序須先演算，這部份視為接近 $t + \Delta t$ 。細粒土砂的質量守恆定律(70)離散化如下式所示。

$$\begin{aligned}
& \frac{c_f^{(t+\Delta t)} (1 - c_c^{(t+\Delta t)}) h^{(t+\Delta t)} - c_f^{(t)} (1 - c_c^{(t)}) h^{(t)}}{\Delta t} \\
& + \frac{M_{(i+1,j)} - M_{(i,j)}}{\Delta x} + \frac{N_{(i,j+1)} - N_{(i,j)}}{\Delta y} = p_f E + f_{cf}
\end{aligned} \tag{99}$$

此處 M 為 u 位置的細粒土砂之全流量， N 為 v 位置細粒土砂之全流量，如下式所示。

$$M_{(i,j)} = c_f(i-1,j) (1 - c_c(i-1,j)) u_{(i,j)} h_{(i-1,j)} \quad 0 \leq u_{(i,j)} \tag{100}$$

$$M_{(i,j)} = c_f(i,j) (1 - c_c(i,j)) u_{(i,j)} h_{(i,j)} \quad u_{(i,j)} < 0$$

$$M_{(i+1,j)} = c_f(i,j) (1 - c_c(i,j)) u_{(i+1,j)} h_{(i,j)} \quad 0 \leq u_{(i+1,j)} \tag{101}$$

$$M_{(i+1,j)} = c_f(i+1,j) (1 - c_c(i+1,j)) u_{(i+1,j)} h_{(i+1,j)} \quad u_{(i+1,j)} < 0$$

$$N_{(i,j)} = c_f(i,j-1) (1 - c_c(i,j-1)) v_{(i,j)} h_{(i,j-1)} \quad 0 \leq v_{(i,j)} \tag{102}$$

$$N_{(i,j)} = c_f(i,j) (1 - c_c(i,j)) v_{(i,j)} h_{(i,j)} \quad v_{(i,j)} < 0$$

$$N_{(i,j+1)} = c_f(i,j) (1 - c_c(i,j)) v_{(i,j+1)} h_{(i,j)} \quad 0 \leq v_{(i,j+1)} \tag{103}$$

$$N_{(i,j+1)} = c_f(i,j+1) (1 - c_c(i,j+1)) v_{(i,j+1)} h_{(i,j+1)} \quad v_{(i,j+1)} < 0$$

2.5.2.1. 動能守恆定律

x方向動能守恆定律(39)左邊第二項及第三項設定為x，右邊第一項設定為y，離散化結果如下式所示。

$$\frac{u^{(t+\Delta t)}\bar{h}^{(t+\Delta t)} - u^{(t)}\bar{h}^{(t)}}{\Delta t} = -X - Y - \frac{\bar{\tau}_b}{\bar{\rho}_m} \frac{u^{(t+\Delta t)} + u^{(t)}}{2\sqrt{u^{(t)^2} + \bar{v}^2}} \quad (104)$$

右邊第三項須進行Vasiliev不安定回避²⁹⁾，將 $u^{(t)}$ 替換為 $(u^{(t+\Delta t)} + u^{(t)})/2$ 。應設定 $h^{(t+\Delta t)}$ 為已知，但依程式的演算順序須先演算，因此這部份視為接近 $t + \Delta t$ 。此處 $\bar{h}$ 、 $\bar{\tau}_b$ 、 $\bar{\rho}_m$ 、 $\bar{v}$ 分別是 h 、 τ_b 、 ρ_m 、 v 空間平均值如下式所示。

$$\bar{h} = (h_{(i-1,j)} + h_{(i,j)})/2 \quad (105)$$

$$\bar{\tau}_b = (\tau_{b(i-1,j)} + \tau_{b(i,j)})/2 \quad (106)$$

$$\bar{\rho}_m = (\rho_{m(i-1,j)} + \rho_{m(i,j)})/2 \quad (107)$$

$$\bar{v} = (v_{(i,j)} + v_{(i,j+1)} + v_{(i-1,j+1)} + v_{(i-1,j)})/4 \quad (108)$$

X如下式所示。

$$X = u \frac{M_{(i,j)} - M_{(i-1,j)}}{\Delta x} + \bar{v} \frac{M_{(i,j)} - M_{(i,j-1)}}{\Delta y} \quad 0 \leq u \quad 0 \leq \bar{v} \quad (109)$$

$$X = u \frac{M_{(i,j)} - M_{(i-1,j)}}{\Delta x} + \bar{v} \frac{M_{(i,j+1)} - M_{(i,j)}}{\Delta y} \quad 0 \leq u \quad \bar{v} < 0 \quad (110)$$

$$X = u \frac{M_{(i+1,j)} - M_{(i,j)}}{\Delta x} + \bar{v} \frac{M_{(i,j)} - M_{(i,j-1)}}{\Delta y} \quad u < 0 \quad 0 \leq \bar{v} \quad (111)$$

$$X = u \frac{M_{(i+1,j)} - M_{(i,j)}}{\Delta x} + \bar{v} \frac{M_{(i,j+1)} - M_{(i,j)}}{\Delta y} \quad u < 0 \quad \bar{v} < 0 \quad (112)$$

此處 M 為 u 位置的水與土砂之全流量，如下式所示。

$$M = \bar{\beta} u \bar{h} \quad (113)$$

此處 $\bar{\beta}$ 為 β 的空間平均值，如下式所示。

$$\bar{\beta} = (\beta_{(i-1,j)} + \beta_{(i,j)})/2 \quad (114)$$

Y 如下式所示。

$$Y = g\bar{h} \frac{H_{(i,j)} - H_{(i-1,j)}}{\Delta x} \quad (115)$$

y 方向的動能守恆定律(39)左邊第二項及第三項設定為 X ，右邊第一項設定為 Y ，離散化結果如下式所示。

$$\frac{v^{(t+\Delta t)}\bar{h}^{(t+\Delta t)} - v^{(t)}\bar{h}^{(t)}}{\Delta t} = -X - Y - \frac{\bar{\tau}_b}{\bar{\rho}_m} \frac{v^{(t+\Delta t)} + v^{(t)}}{2\sqrt{v^{(t)^2} + \bar{u}^2}} \quad (116)$$

右邊第三項須進行Vasiliev不安定回避²⁹⁾， $v^{(t)}$ 替換為 $(v^{(t+\Delta t)} + v^{(t)})/2$ 。此處 $\bar{h}$ 、 $\bar{\tau}_b$ 、 $\bar{\rho}_m$ 、 $\bar{v}$ 分別是 h 、 τ_b 、 ρ_m 、 v 的空間平均值如下式所示。

$$\bar{h} = (h_{(i,j-1)} + h_{(i,j)})/2 \quad (117)$$

$$\bar{\tau}_b = (\tau_{b(i,j-1)} + \tau_{b(i,j)})/2 \quad (118)$$

$$\bar{\rho}_m = (\rho_{m(i,j-1)} + \rho_{m(i,j)})/2 \quad (119)$$

$$\bar{u} = (u_{(i,j)} + u_{(i,j-1)} + u_{(i+1,j-1)} + u_{(i+1,j)})/4 \quad (120)$$

X 如下式所示。

$$X = \bar{u} \frac{N_{(i,j)} - N_{(i-1,j)}}{\Delta x} + v \frac{N_{(i,j)} - N_{(i,j-1)}}{\Delta y} \quad 0 \leq \bar{u} \quad 0 \leq v \quad (121)$$

$$X = \bar{u} \frac{N_{(i,j)} - N_{(i-1,j)}}{\Delta x} + v \frac{N_{(i,j+1)} - N_{(i,j)}}{\Delta y} \quad 0 \leq \bar{u} \quad v < 0 \quad (122)$$

$$X = \bar{u} \frac{N_{(i+1,j)} - N_{(i,j)}}{\Delta x} + v \frac{N_{(i,j)} - N_{(i,j-1)}}{\Delta y} \quad \bar{u} < 0 \quad 0 \leq v \quad (123)$$

$$X = \bar{u} \frac{N_{(i+1,j)} - N_{(i,j)}}{\Delta x} + v \frac{N_{(i,j+1)} - N_{(i,j)}}{\Delta y} \quad \bar{u} < 0 \quad v < 0 \quad (124)$$

此處 N 為 v 位置的水與土砂全流量，如下式所示。

$$N = \bar{\beta} v \bar{h} \quad (125)$$

此處 $\bar{\beta}$ 為 β 的空間平均值，如下式所示。

$$\bar{\beta} = (\beta_{(i,j-1)} + \beta_{(i,j)})/2 \quad (126)$$

Y 如下式所示。

$$Y = g\bar{h} \frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{\Delta y} \quad (127)$$

3. 演算模型的應用案例

本演算模型之降雨逕流形態、土石流運動形態以及土石流氾濫形態分析模型都應用在實際發生的案例上，並檢討其重現性與模型設定值。所檢討的3個案例如下。

1．降雨逕流

應用於2017年九州北部豪雨的寺內壩流域。寺內壩之水壩入流量數據已公開在國土交通省水文水質資料庫³⁰⁾網站。水壩入流量視為與流域下端時水壩之逕流量相同，以水壩入流量可進行降雨逕流演算驗證。應用於2017年九州北部豪雨寺內壩的降雨逕流形態演算模型，將其結果和水壩入流量數據進行比較，檢討降雨逕流形態分析模型適用性高低。

2．土石流逕流

應用於櫻島有村川2014年8月所發生的土石流。櫻島有村川於有村川3號壩實施土石流的表面流速、表面形狀、載重量測。以這些數據算出土石流的水深平均流速及流動深度的逐時變化，並與演算結果做比較，檢討土石流逕流形態分析模型適用性高低。

3．土石流氾濫

應用於1999年九州北部豪雨的阿蘇古惠川土石流。1990年7月豪雨引致阿蘇市一宮町古惠川土石流氾濫，引致土砂災害。後來完成該災害發生時刻、土石流軌跡以及氾濫範圍與氾濫土砂量調查結果³¹⁾。這些資訊可用來檢討土石流逕流及土石流氾濫形態分析模型之重現性高低。

3.1. 降雨逕流模式

應用在2017年九州北部豪雨時的寺內壩流域。寺內壩之入流量數據公布在國土交通省水文水質資料庫³⁰⁾。水壩入流量視同流域下端水壩的逕流量，以水壩入流量進行降雨逕流形態演算驗證。應用於2017年九州北部豪雨寺內壩的降雨逕流形態演算模型，將其結果和水壩入流量數據進行比較，檢討演算模型的適用性。

3.1.1. 分析模型

分析模型係應用「2.3 降雨逕流模型」。

3.1.2. 演算所使用數據與條件

演算所使用數據與條件如下。

- 地形數據：使用國土地理院數值高程模型（10 m）³²⁾。製作地形模型時進行 JGD2011II 投影變換，並實施雙線型內插值插補。圖11為模型應用範圍與河道網。集水面積為51km²。河道上游端採集水面積大於0.9公頃的網格單元。
- 河道斷面：河道斷面形狀近似矩形，寬 W 與深 D 分別標示為 $W = C_w A^{S_w}$ 、 $D = C_d A^{S_d}$ ³³⁾。在此， A 為集水面積（km²）、 C_w 、 S_w 、 C_d ， S_d 則是經驗參數。
- 降雨數據：使用國土交通省所提供XRAIN數據之10分鐘值。但與DIAS所提供的XRAIN³⁴⁾不同。圖12為流域平均雨量之逐時變化。
- 出流量數據：將國土交通省水文水質資料庫³⁰⁾之寺內壩入流量視為水壩流域的出流量，用來和演算結果進行比較。
- 初期條件：表土層平均含水率設定為 p_{wc} ，滲流水深設定為0。表1為演算時所給予的物性值。以試誤法設定這些值，讓演算值儘量靠近量測結果。

3.1.3. 演算結果

圖13比較了逕流量演算結果與觀測結果。演算所確認逕流量遽增時刻及洪峰流量、退水逐時變化都顯示接近觀測值。

表 1 演算時所給予的物性值

降雨逕流模型：二維	值	逕流演算模型：一維	值
空間刻度 $\Delta x, \Delta y$ (m)	30	距離刻度 Δx (m)	30
表土層厚度 D (m)	1.0	河寬係數 C_w	4.73
飽和體積含水率 $\lambda^{35)}$	0.4	河寬係數 S_w	0.58
殘留體積含水率 $p_{wc}^{35)}$	0.1	深度係數 C_d	1.5
表層入滲量 $f_{s1}^{35)}$ (mm/h)	200.0	深度係數 S_d	0.4
下層入滲量 f_{s2} (mm/h)	0.0	曼寧粗糙係數 n	0.05
飽和透水係數 $k^{35)}$ (cm/s)	1.0		
等價粗糙係數 $N^{35)}$	0.5		

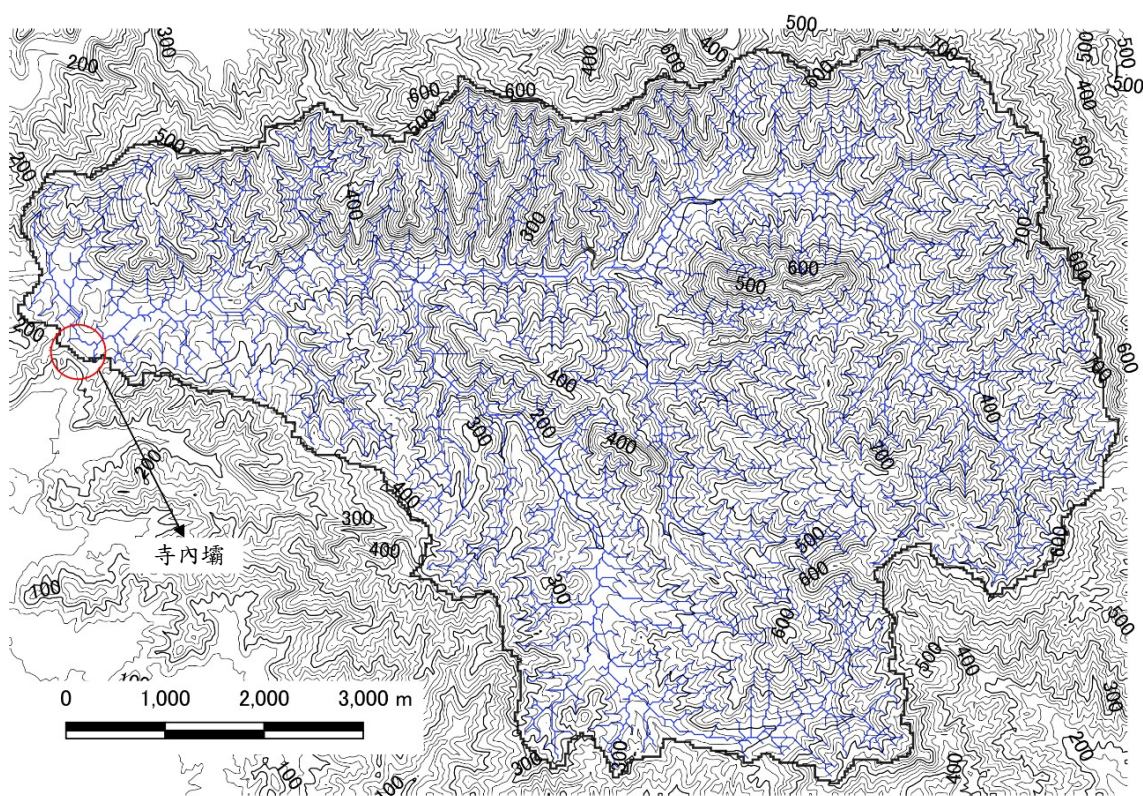


圖 11 模型的適用範圍與河道網（國土地理院由數值高程模型形成等高線）

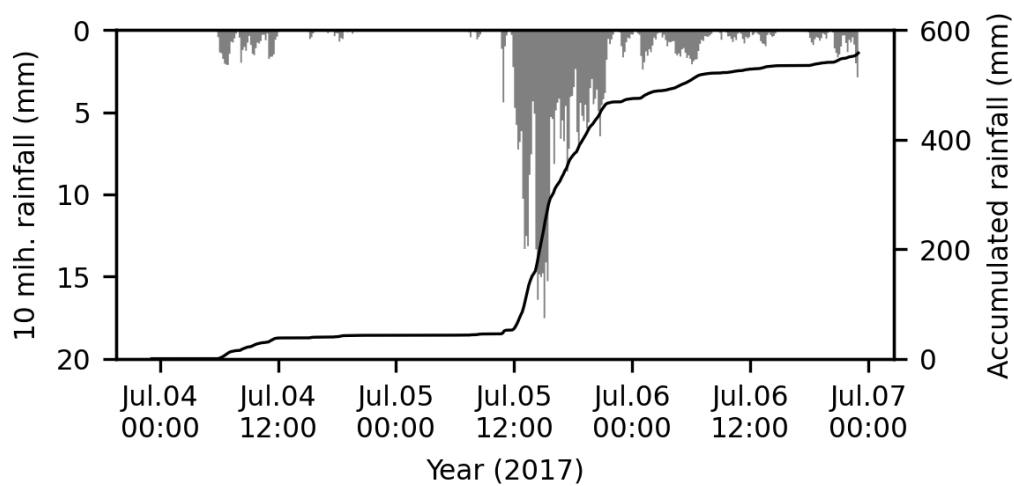


圖 12 流域平均雨量之逐時變化

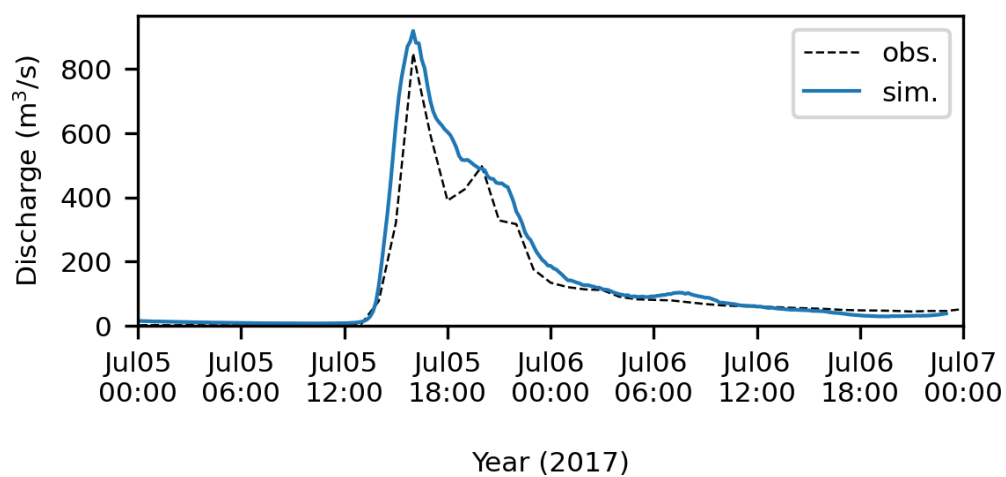


圖 13 水壩流域下端的演算出流量 (sim.) 與觀測水壩入流量 (obs.)

3.2. 土石流運動模式

應用於櫻島有村川2014年8月所發生的土石流。櫻島有村川於有村川3號壩量測到土石流表面流速、表面形狀與載重。以此數據演算土石流的水深平均流速及流動深度的逐時變化，和演算結果比較，檢討本模型的適用性。

3.2.1. 櫻島有村川之土石流觀測

3.2.1.1. 對象河道

圖14為有村川3號壩（以下稱為「壩」）上游地形圖，圖15為R01、R02河道縱斷面圖。有村川流域位於櫻島東南坡面，水壩上游流域面積約1.6 km²。R01河道從1,500m往上游為22~33°陡坡，R02河道則即使最陡區間也都是12°。圖14為2013年10月17、26日所完成空載光達測量成果及2014年10月24、26、27量測到的高程差分值。從高程差分值的-0.5m除去0.5m，高程減少領域視為侵蝕區域，R01及R02流域2013年10月到2014年10月的土砂量分別為118千m³、5千m³。因此，水壩淤積土砂推估主要是由R01河道所供給。以此R01河道為數值分析對象範圍。水壩往上游50m區間的河床坡降為4°，淤積坡降約為3~6°。

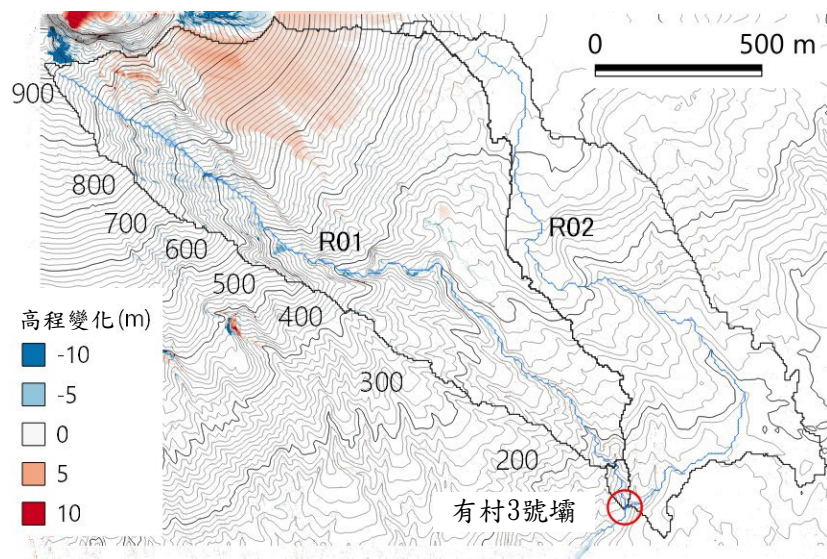


圖 14 有村川位置及平面圖（國土地理院 數值高程模型所生成之等高線）

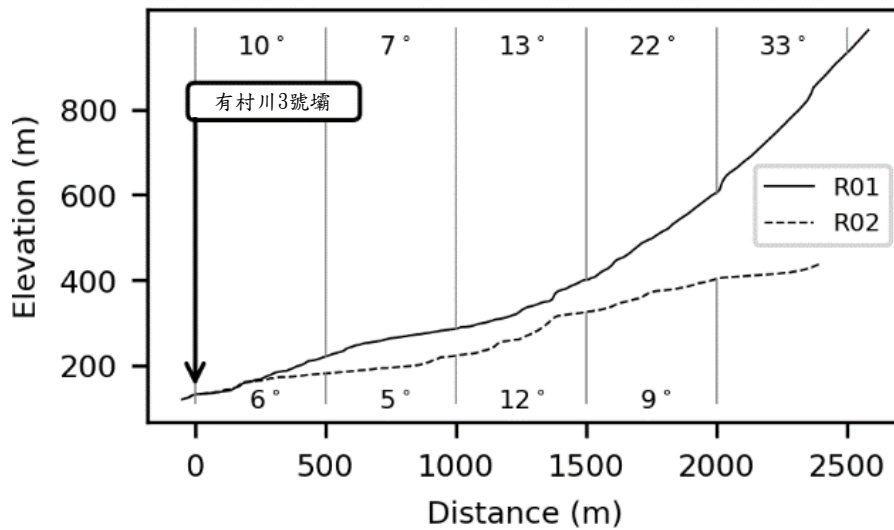


圖 15 R01，R02河道縱斷面圖

3.2.1.2. 觀察項目與方法

圖16為2019年10月18日所拍攝堤壩、載重計、位移感測器及流速計配置狀況。載重計於堤壩溢洪口左岸側寬4公尺縱深2公尺、厚度32釐米鐵板下段設置4座³⁶⁾。堤壩上段設置位移感測器與超音波流速計，位移感測器用來量測壩溢洪口橫斷方向土石流表面形狀³⁶⁾。載重計、位移感測器及超音波流速計之取樣率分別為100 Hz、20 Hz、1 MHz。載重計解析度為1.62 kPa/m²、位移感測器解析度為1 mm，0.25°/迴轉，流速計解析度為1 m/s。這些感測器獨立系統運作，時刻也各自獨立，因此須每1~2個月定期維護保養進行時刻校正。



圖 16 2019年10月18日所拍攝堤壩觀測儀器配置狀況

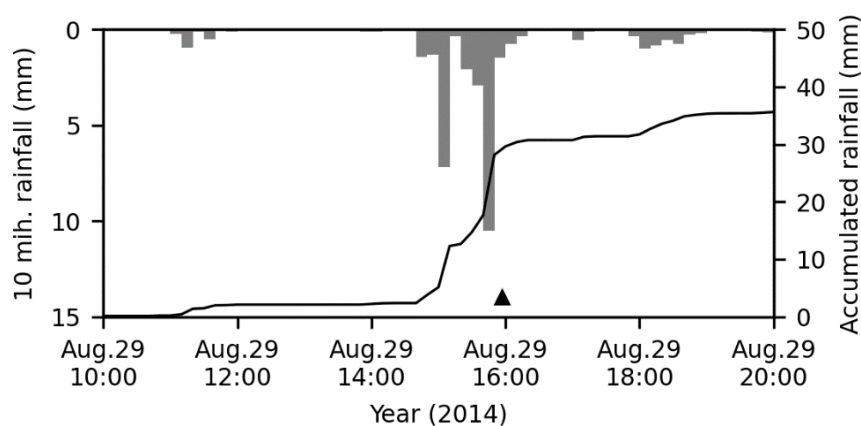


圖 17 XRAIN所呈現流域平均雨量逐時變化 (▲為土石流發生的時間)

3.2.1.1. 觀測結果

本稿為有利於簡易分析，由觀測結果選定具有單一高峰且形態（歷線）明顯2014年8月29日15時57分（以下簡稱8月29日）發生的土石流作為分析對象。8月29日流域平均雨量、流動深度及表面流速之逐時變化如下。

圖17為依據XRAIN³⁴⁾所製作流域平均雨量逐時變化。此外，▲代表土石流發生的時間。土石流發生時刻10分鐘雨量為10mm，8月29日24小時雨量為36mm。

圖18為2014年8月29日15時57分所發生土石流從發生時刻開始的流動深度 h 、表面流速 μ 以及土石流密度 ρ_m 之變化。流動深度 h 為載重計橫斷面寬4m之平均值。土石流密度 ρ_m 係將所量測到的載重視為垂直應力值，並以載重計上的土石流除以近似長方體的體積而算出³⁶⁾。

土石流發生7分鐘後流動深度 h 、流速 μ 以及土石流密度 ρ_m 都遽增，此時土石流應已到達堤壩。流動深度 h 、流速 μ 以及土石流密度 ρ_m 都有明顯的單一高峰，高峰出現時間點分別是10、11、17分鐘後，數值為0.95 m、4.8 m/s、1.67 cm³/s。土石流密度 ρ_m 的時間變化比逐時流動深度 h 與逐時流速 μ 之變化還小，高峰出現時間點也較慢。

此外，粗粒土砂濃度 c_c 與孔隙流體密度 ρ 推估如下。堤壩之土石流流動假定處於平衡狀態，前述平衡坡降公式(36)與土石流質量密度公式(37)的平衡坡降若置換成河床坡降，土石流的粗粒土砂濃度 c_c 與孔隙流體密度 ρ 如下式所示。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_c}{(\sigma/\rho - 1)c_c + 1} \tan \phi \quad (128)$$

$$\rho_m = (\sigma - \rho)c_c + \rho \quad (129)$$

$$c_c = \frac{\rho_m}{\sigma - (1 - \tan \theta / \tan \phi)\rho_m} \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \quad (130)$$

$$\rho = \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \rho_m \quad (131)$$

圖19為由式(130)、(131)所算出粗粒土砂濃度 c_c 與孔隙流體密度 ρ 從發生時刻開始的變化。土石流密度 ρ_m 輸入觀測所取得時間序列值，河床坡降 θ 輸入觀測地河床坡降4°即可算出。粗粒土砂濃度 c_c 第17分鐘時見到高峰，值為0.14。孔隙流體密度 ρ 也相同時刻達高峰，值為1.51 g/cm³。

有村川觀測到的土石流主要材料為火山灰及河床堆積物。這些物質粒徑分布明顯影響土石流流動性並決定細粒土砂含有率及代表粒徑大小。

圖20為火山灰與河床堆積物粒徑分布。火山灰粒徑分布係以2014年10月21日及11月13日堤壩附近所採集試料進行篩分析及沉降分析而算出。河床堆積物粒徑分布係將2014年10月23日堤壩附近所採集少於37.5mm的試料進行篩分析及沉降分析，結果和2019年10月18日所拍攝影像（圖21）之分析結果合成而算出。

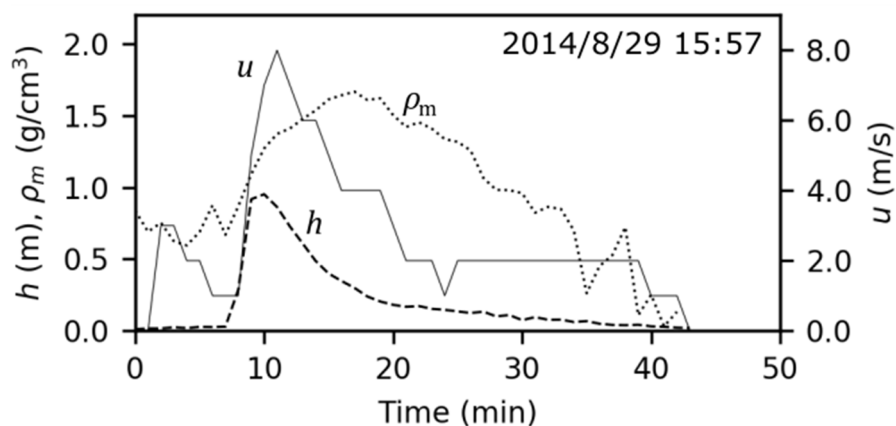


圖 18 土石流發生時間點之後的土石流流動深度 h 、流速 u 以及密度 ρ_m 之逐時變化

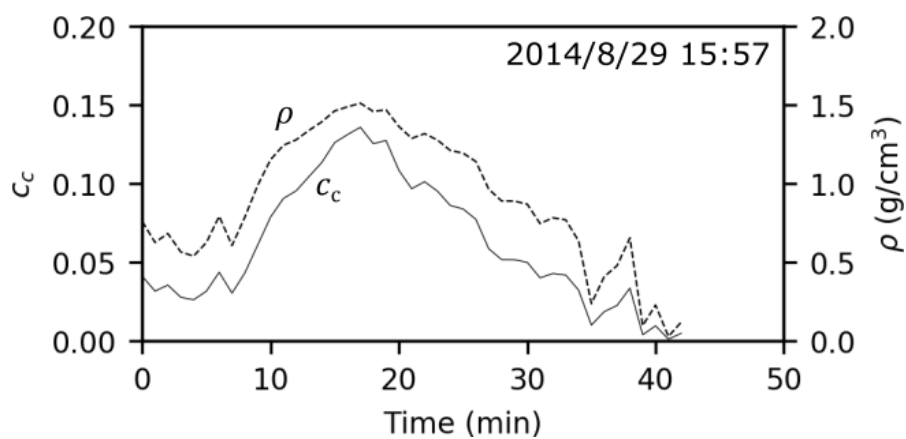


圖 19 土石流發生時間點之後的土石流的粗粒土砂濃度 c_c 及孔隙流體密度 ρ 之逐時變化

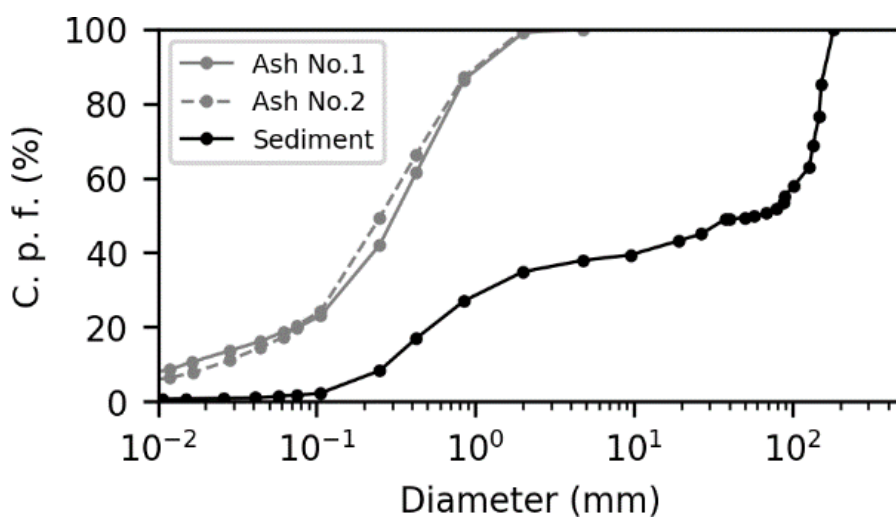


圖 20 火山灰與河床堆積物的粒徑分布



圖 21 2019年10月18日所拍攝堤壩附近堆積物礫石

3.2.2. 分析模型

分析模型可使用「2.4 土石流運動模式」。

3.2.3. 演算所使用數據與條件

地形數據可使用國土地理院數值高程模型（10 m）³²⁾。表2為演算時所給的物性值。堆積物厚度、代表粒徑、細粒土砂含有率及黏著力都儘量讓演算所取得的流動深度與流速之逐時變化接近觀測值地以試誤法定之。坡面水流進入河道的給水條件實況不明，以試誤法權宜地用水讓堆積物含水飽和，然後從河道上游端開始穩定地設定 $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表 2 演算所給予的物性值

土石流運動模式：一維		值
距離刻度 Δx (m)	10	
河道寬 B (m)		10
堆積深度（侵食可能深度） D (m)		1.0
代表粒徑 d (m)		0.2
細粒土砂含有率 p_f		0.3
水的質量密度 $\rho_w^{19)}$ (kg/m^3)		1000
砂礫的質量密度 $\sigma^{19)}$ (kg/m^3)		2650
砂礫的內摩擦角 $\phi^{19)}$ ($^\circ$)		35
堆積土砂濃度 $c_*^{19)}$		0.6
曼寧粗糙係數 n		0.05

3.2.4. 演算結果

依據重現演算結果，圖22為堤壩地點流動深度 h 與流速 u 之演算值。此外，也說明了圖18所取得的觀測值。發生源之土石流發生時刻不明，因此演算值與觀測值都發現堤壩地點流動深度 h 與流速 u 從0遽增之峰值，且圖18的8分鐘值與圖22開始演算後的4分鐘值一致，代表本演算結果具重現性。流速 u 的演算值在開始演算4分鐘之後遽增，5分鐘之後達到4.2m/s，之後的演算值與觀測值都逐步減少，流動深度 h 的演算值在4分鐘之後遽增，5分鐘後達到1.4m。之後與觀測值都逐步減少。

圖23之中土石流觀測所取得粗粒土砂濃度 cc 之演算值與以分析模型取得的演算值，都和圖22一致。粗粒土砂濃度 cc 演算值從4分鐘到5分鐘之間呈0到0.2直線遽增。之後和緩地降低。另一方面，觀測值上部呈凸狀變化，峰值則是0.14。

由上可知，重現演算不論流動深度與流速都呈接近觀測值的值，取得了增加與減少傾向完成整合的結果。這項結果顯示，土石流運動演算模型似乎也可應用於土石流實務分析工作。

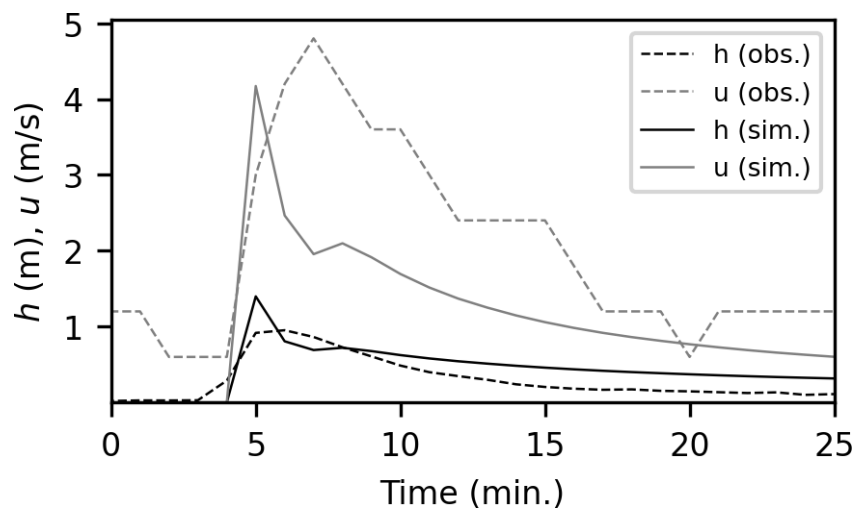


圖 22 流動深度 h 與水深平均流速 v 之逐時變化 (obs.: 觀測值, sim.: 演算值)

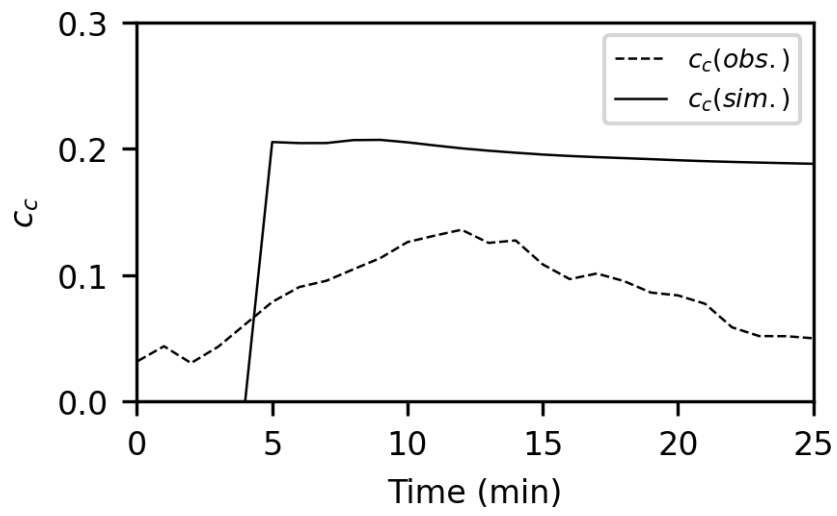


圖 23 粗粒土砂濃度 c_c 之逐時變化 (obs.: 觀測值, sim.: 演算值)

3.3. 土石流氾濫模式

適用於1999年九州北部豪雨時發生的阿蘇古惠川土石流。1990年7月豪雨造成阿蘇市一之宮町發生古惠川土石流氾濫引致土砂災害。該災害後來有災害發生時刻、土石流軌跡、氾濫範圍及氾濫區域土砂量相關調查結果³¹⁾。運用這些資訊可檢討土石流運動及土石流氾濫之重現性。

3.3.1. 阿蘇古惠川土石流災害概要

圖24為A Me DAS（自動氣象數據採集系統）阿蘇乙姬地點的1990年7月2日時雨量。最大時雨量為7月2日9時到10時的67mm，24小時雨量為448mm。坂梨地區與松原橋同時在9時20分土石流到達，松原橋土石流流動持續時間1小時³¹⁾。阿蘇古惠川氾濫所產生土砂總量推估為36萬 m^3 ³¹⁾。谷口地點（後述圖25○）的土石流流動軌跡調查結果³¹⁾顯示，高峰流量為 $960m^3/s$ 。

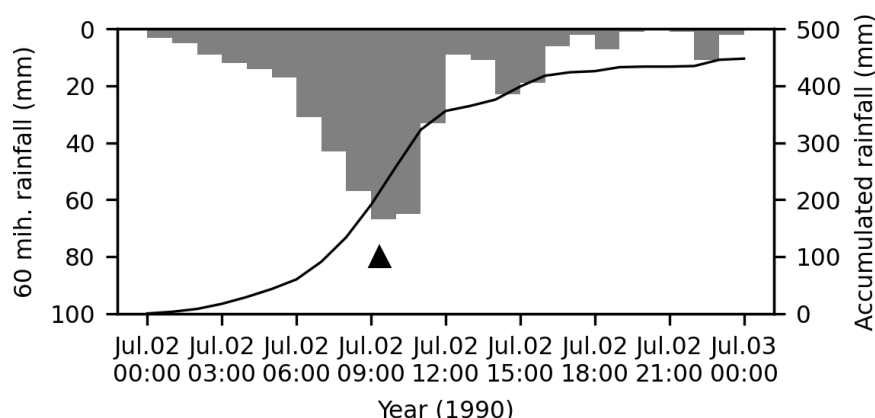


圖 24 AMeDAS阿蘇乙姬地點的時雨量

3.3.2. 分析模型

分析模型針對發生氾濫範圍的上游集水區適用「2.3 降雨逕流模式」及「2.4 土石流運動模式」，氾濫範圍適用「2.5 土石流氾濫模式」。圖25為降雨逕流模式、土石流運動模式之適用範圍以及土石流氾濫模式的適用範圍。

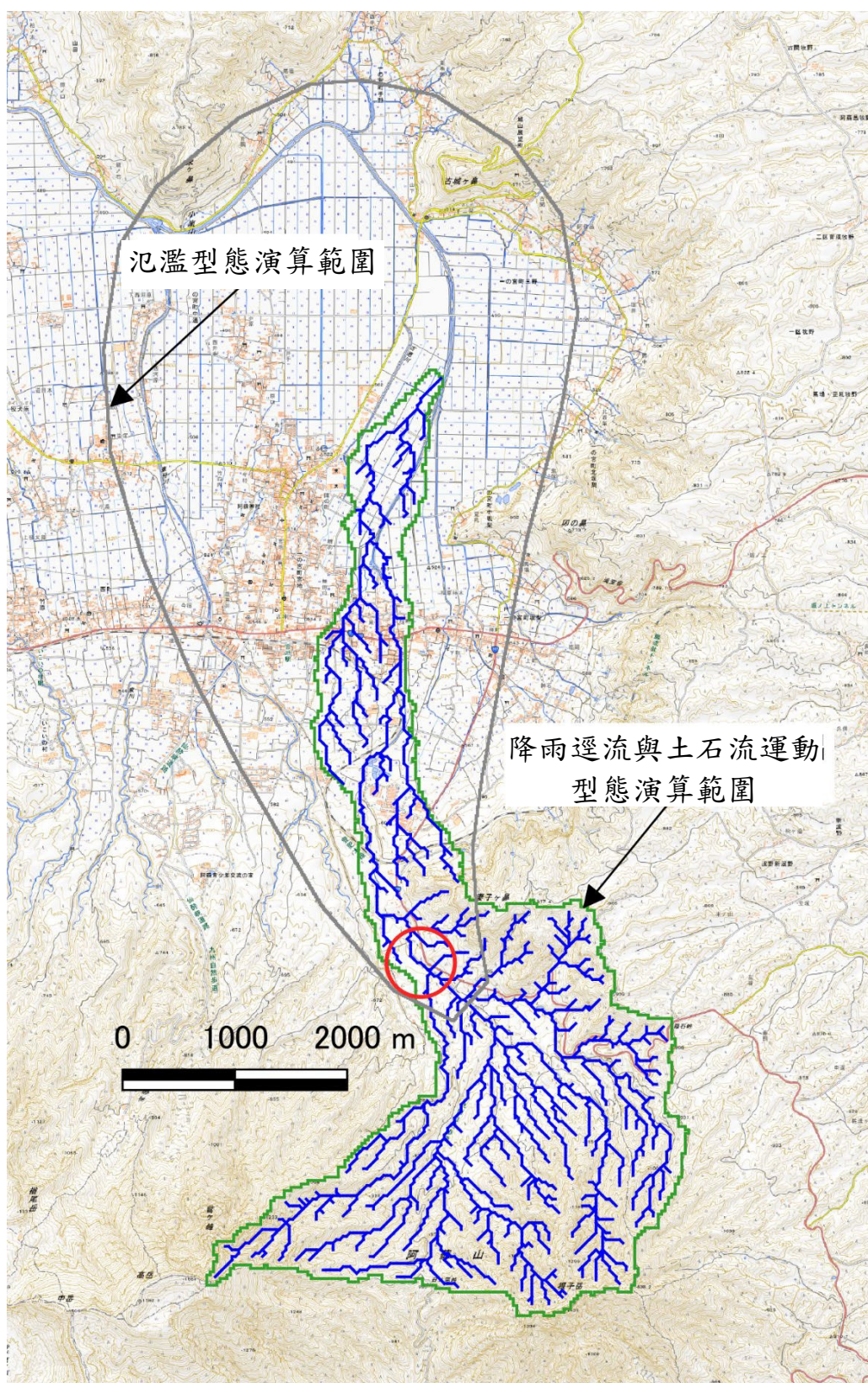


圖 25 模型的適用範圍及谷口地點(○) (背景圖使用地理院地圖)

3.3.3. 演算所使用數據與條件

演算所使用數據與條件如下。

- 地形數據：使用國土地理院數值高程模型（10 m）³²⁾。製作地形模型時進行 JGD2011II 投影變換，並實施Bilinear雙線型內插值插補。圖25為模型適用範圍與河道網。谷口上游區域集水面積為8.4 km²。河道上游端為集水面積大於0.9公頃的網格單元。
- 河道斷面：河道斷面形狀近似矩型，其寬 $W = 15$ m，深度 $D = 2$ m。
- 降雨數據：將AMeDAS阿蘇乙姬地點的1小時數據（圖24）均等地放到演算領域整體之中。用來判斷土石流是否會發生的雨量時間解析度（率）需達到10分鐘左右^{37)、38)}，因此若要分析土石流現象，最好使用間隔10分鐘的數據。本檢討使用災害發生時立刻能取得的數據，以及1小時數據。

圖25的○所示地點上游已完成控制、不會產生溢流。本分析模型係依據土石流表面高程與流路側岸之地盤高程而決定溢流發生地點。但若希望權宜控制避免溢流發生，一旦決定這樣的地點，就能避免上游發生溢流以及溢流引致河道流量減少的問題。但若已完成重現性更高的地形演算模型，就不需要這類處理過程。

表3為演算時所給予的物性值。若無參考資料，可利用與現地調查³¹⁾所推估洪峰流量960 m³/s 及土砂堆積量36萬 m³演算值相近的試誤法決定之。

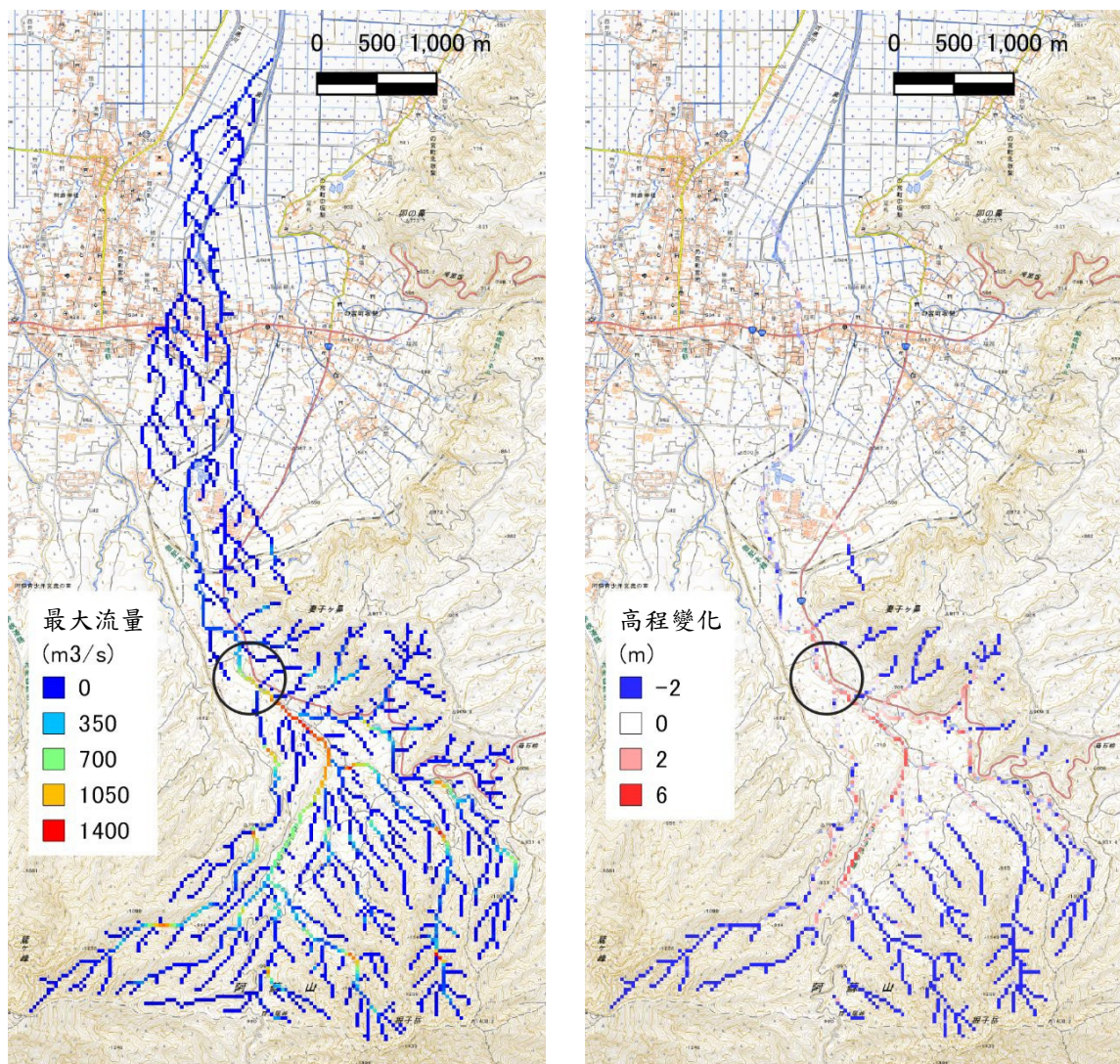
滲流水深之初期條件如下。首先設定滲流水深之初期值為0，然後以不考慮堆積物移動的狀態（設定侵蝕與堆積速度經常為0之狀態）進行演算，並給予演算終了時的滲流水深。

表 3 演算時所給の物性値

降雨逕流模式：二維	値
空間刻度 $\Delta x, \Delta y$ (m)	30
表土層厚 D (m)	2.0
飽和體積含水率 $\lambda^{35)}$	0.43
殘留體積含水率 $p_{wc}^{35)}$	0.045
表層入滲量 $f_{s1}^{35)}$ (mm/h)	36.0
下層入滲量 f_{s2} (mm/h)	36.0
飽和透水係數 $k^{35)}$ (cm/s)	0.001
等價粗糙係數 $N^{35)}$	0.1
土石流運動模式：一維	値
距離刻度 Δx (m)	30
河道寬 B (m)	15
堆積深度（侵蝕可能深度） D (m)	2.0
代表粒徑 d (m)	0.1
細粒土砂含有率 p_f	0.4
水の質量密度 $\rho_w^{19)}$ (kg/m ³)	1000
砂礫の質量密度 $\sigma^{19)}$ (kg/m ³)	2650
砂礫の内摩擦角 $\phi^{19)}$ (°)	35.0
黏著力 c (N/m ²)	3000
堆積土砂濃度 $c_*^{19)}$	0.6
土石流氾濫模式：二維	値
空間刻度 $\Delta x, \Delta y$ (m)	10
堆積深度 D (m)	0.0
代表粒徑 d (m)	0.01
細粒土砂含有率 p_f	0.2
水の質量密度 $\rho_w^{19)}$ (kg/m ³)	1000
砂礫の質量密度 $\sigma^{19)}$ (kg/m ³)	2650
砂礫の内摩擦角 $\phi^{19)}$ (°)	35.0
堆積土砂濃度 $c_*^{19)}$	0.6

3.3.4. 演算結果

圖 26 為土石流運動模式之演算結果，顯示從各設定時間輸出的土石流流量所提取（提取）最大值之空間分布（a），以及演算結束時河床高程變化量的空間分布（b）。最大流量為所設定溢流開始點上游 1000 m 左右地點的 $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ 。溢流開始點最大流量為 $960 \text{ m}^3/\text{s}$ 。



(a) 最大流量

(b) 河床的高程變化

圖 26 最大流量與河床的高程變化（○為谷口）（背景圖使用地理院地圖）

3.3.4.1. 土石流流量歷線

圖 27 為谷口的土石流（水、粗粒土砂、細粒土砂）、粗粒土砂及細粒土砂之流量與累積逕流量逐時變化。粗粒土砂與細粒土砂之累積流量分別為 $78.6 \times 10^3 \text{ m}^3$ 與 $186.7 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。這些都不含孔隙，因此若孔隙率設定為 0.4，合計便是 $442 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。此外，土石流的洪峰流量為 $1050 \text{ m}^3/\text{s}$ ，其發生時刻接近土石流實際發生時刻³¹⁾ 9 時 20 分。此外，洪峰流量與圖 26 內容有差異的原因是，圖 26 是各輸出設定時間的瞬間值之提取值，圖 27 則是累積值所算出之值，因此產生差異。

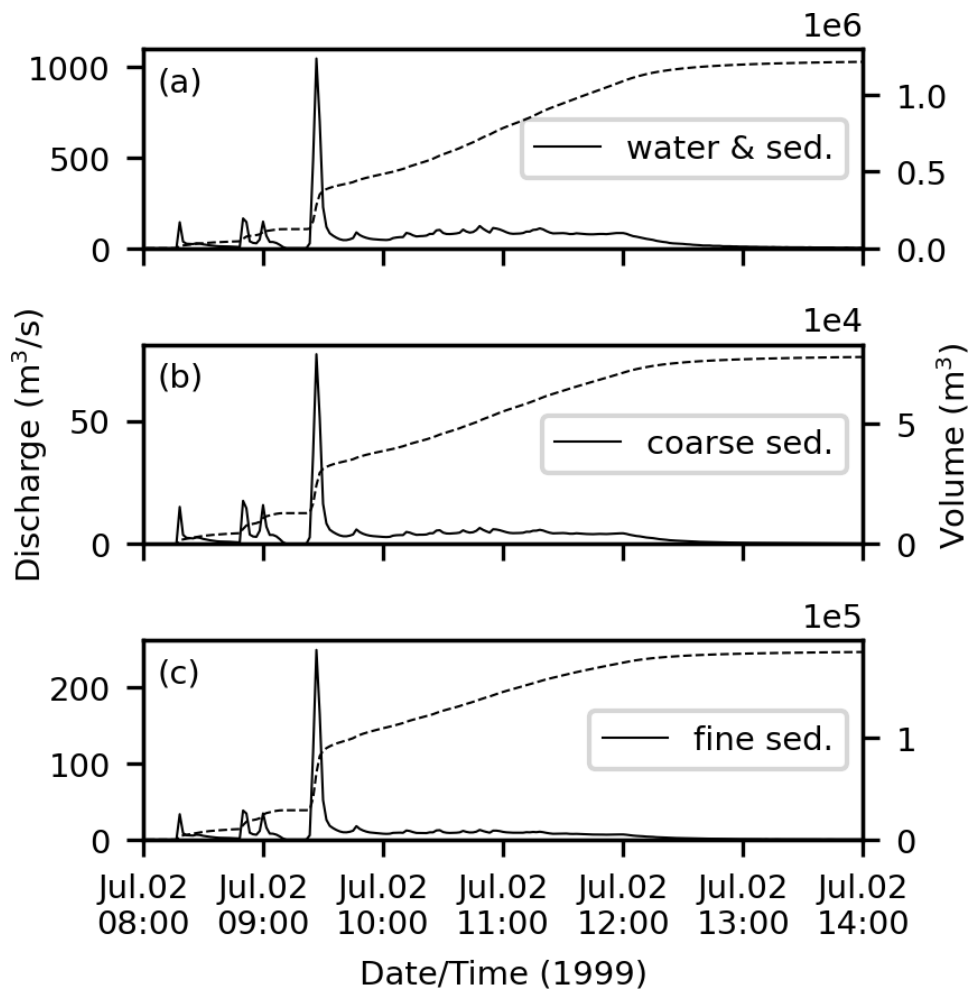


圖 27 土石流的流量歷線（實線：逐時變化，虛線：累積值，
a：水+粗粒土砂+細粒土砂，b：粗粒土砂，c：細粒土砂）

3.3.4.2. 土石流氾濫

圖 28 為最大流動深度之演算值與調查結果所確認氾濫範圍。最大流動深度小於 0.01 m，未標示。演算結果發現，流動深度主要位於氾濫水滯留領域的北端。原因推估是，地形模型上已標示水路與道路填方，因此有所改善。

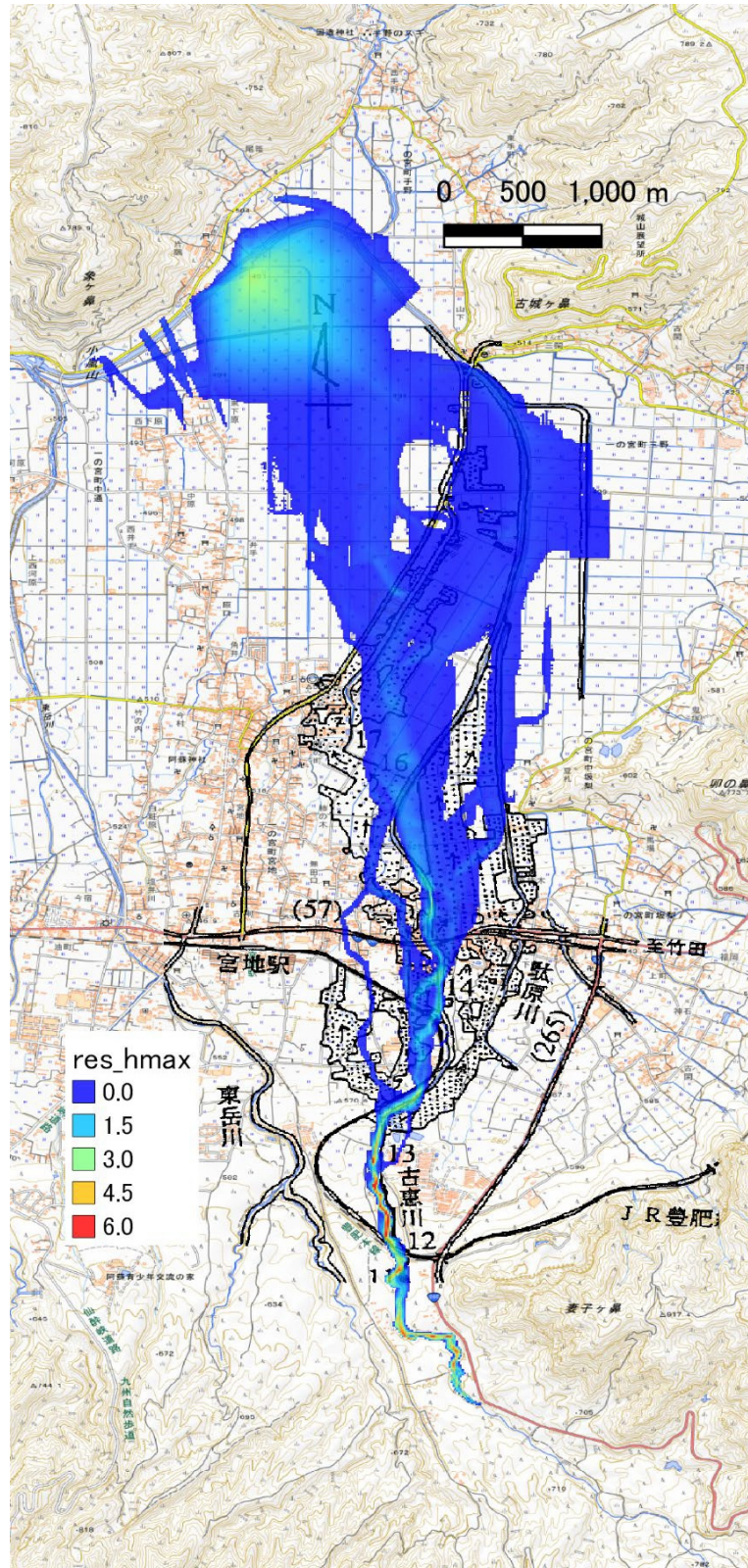


圖 28 最大流動深度(小於0.01m，不標示)與調查結果³¹⁾ (背景圖使用地理院地圖)

4. 結語

本文介紹可利用降雨與降灰厚度分布等時空間解析度及實時性俱高的數據而提升土石流氾濫危險度評估精度的降雨逕流型態-土石流逕流型態-土石流氾濫模式，適用到實際發生的案例進行驗證。結果如下所示。

分別就降雨逕流型態之中的洪水流量逐時變化、土石流運動型態之中的流速與流動深度逐時變化以及土石流氾濫型態之中的谷口土石流流量及氾濫範圍，檢討其重現性。結果顯示洪水流量、土石流流速與流動深度之逐時變化以及谷口土石流流量都具有良好重現性。土石流氾濫範圍也發現與調查結果不一致的部分。原因推估是洪氾平原地形標示水路與道路填方，因此獲得改善。

本分析模型之各輔助模型所應用的理論都使用了既有的研究成果^{10),11)}，但現場發生水與土砂移動現象之應用案例不多。因此，今後應運用各種案例來檢討模型設定妥當性。此外，由此可知，尚未發生土砂災害地區之模型應用，須慎重地選定。

本文所使用且附錄所列出之原始碼，乃是編輯既有研究成果^{17),19)}而成。

参考文献

- 1) 内田太郎，山越隆雄，清水武志，吉野弘祐，木佐洋志，石塚忠範：河道閉塞（天然ダム）及び火山の噴火を原因とする土石流による被害範囲を速やかに推定する手法，土木技術資料，Vol.53，No.7，pp.18-23，2011．
- 2) 清水武志，内田太郎，山越隆雄，石塚忠範：天然ダムによる土石流想定範囲計算システム（QUAD-L）の開発と 2011 年台風 12 号災害における適用，土木技術資料，Vol.54，No.10，pp.14-17，2012．
- 3) 高橋保・匡尚富：変勾配流路における土石流の形成，京都大学防災研究所年報，29 号，B-2，pp.343-359，1986．
- 4) 高橋保・中川一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，砂防学会誌，44 巻，3 号，pp.12-19，1991．
- 5) 中川一・高橋保・里深好文・川池健司：1999 年ベネズエラのカムリグランデ流域で発生した土砂災害について—数値シミュレーションによる再現計算と砂防施設配置効果の評価—，京都大学防災研究所年報，44 号，B-2，pp.207-228，2001．
- 6) 中谷加奈，里深好文，水山高久：GUI を実装した土石流一次元シミュレータ開発，砂防学会誌，61 巻，2 号，pp.41-46，2008．
- 7) 里深好文，水山高久：砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算，砂防学会誌，58 巻，1 号，pp.14-19，2005．
- 8) 中谷加奈，和田孝志，里深好文，水山高久：GUI を実装した汎用土石流シミュレータ開発，第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.149-154，2008．
- 9) 和田孝志，里深好文，水山高久：土石流計算における 1 次元・2 次元シミュレーションモデルの結合，砂防学会誌，61 巻，2 号，pp.36-40，2008．
- 10) 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，Vol.41，pp.789-794，1997．
- 11) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム（Ⅰ），砂防学会誌，46 巻，1 号，pp.45-49，1993．
- 12) 竹林洋史，江頭進治，藤田正治：2013 年 10 月に伊豆大島で発生した泥流の平面二次元解析，河川技術論文集，第 20 巻，pp.391-396，2014．
- 13) 江頭進治，伊藤隆郭：土石流の数値シミュレーション，日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌，第 12 巻，第 2 号，pp.33-43，2004．
- 14) 山崎祐介，林真一郎，石井靖雄：火山噴火後に発生する土石流の氾濫リスク評価の精度向上と、降灰厚分布情報を迅速にリスク評価に反映するシステムの開発，土木技術資料，Vol.61，No.12，pp.8-11，2019．
- 15) 里深好文，吉野弘祐，小川紀一郎，森 俊勇，水山高久，高濱淳一郎：高礫山天然ダム決壊時に発生した洪水の再現，砂防学会誌，59 巻，6 号，pp.32-37，2007．
- 16) 西口幸希，内田太郎，田中健貴，蒲原潤一，奥山遼佑，日名純也，松原智生，桜井 亘：

- 深層崩壊の発生に伴う土砂移動現象と被害発生位置の実態，砂防学会誌，68 巻，6 号，pp.31-41，2016．
- 17) 山崎祐介，江頭進治，岩見洋一：避難予警報のための土砂災害シミュレーターに関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），Vo.72，No.4，pp.I_1327-I_1332，2016．
 - 18) 江頭進治，萬矢敦啓，エスカローナ・ロシレット，山崎祐介，工藤 俊：土石流形成における微細砂の役割，平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集，B，pp.72-73，2016．
 - 19) 山崎祐介，江頭進治：豪雨に伴う土砂・流木の生産と流下過程に関する研究，河川技術論文集，第 24 巻，pp.71-76，2018．
 - 20) 江頭進治，宮本邦明，竹林洋史：崩壊に伴う土石流・泥流の形成と規模の決定機構，砂防学会誌，68 巻，5 号，pp.38-42，2016．
 - 21) Chen C.Y., Fujita M.: A method for predicting landslides on a basin scale using water content indicator，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.70，No.4，pp.I_13-I_18，2014．
 - 22) 竹林洋史，江頭進治，藤田正治：2013 年10 月に伊豆大島で発生した泥流の現地調査と数値解析，京都大学防災研究所年報，57 号，B，pp.372-378，2014．
 - 23) 山崎祐介，江頭進治，南雲直子：豪雨時における土砂流出量の推定法，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74，No.4，pp.I_931-I_936，2018．
 - 24) 芦田和男，江頭進治，劉炳義：二層モデルによる複断面河道の流れおよび河床変動の数値解析，京都大学防災研究所年報，第 35 号，B-2，pp.41-62，1992．
 - 25) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 調査編，2014．
 - 26) 森林水文学編集委員会編：森林水文学 森林の水のゆくえを科学する，森北出版株式会社，2007．
 - 27) Julien P. Y., Paris A.: Mean velocity of mudflows and debris flows, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.136, No.9, pp.676-679, 2010.
 - 28) 日野幹雄：明解水理学，丸善，1983．
 - 29) 高橋保，中川一，西崎丈能：堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，29 号，B-2，pp.431-450，1986．
 - 30) 国土交通省水管理・国土保全局：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>
 - 31) 橋本晴行，平野宗夫，林 重徳，梅村 順：1990 年7 月熊本県一の宮町の土石流災害について，水文・水資源学会誌，Vol.4，No.1，pp.25-32，1991．
 - 32) 国土地理院基盤地図情報：<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>
 - 33) 田中茂信，佐山敬洋：降雨の極値統計と流出・氾濫現象の現地調査及びモデリング，2017 年九州北部豪雨災害調査報告書，京都大学防災研究所，pp.72-79，2018．
 - 34) DIAS XRAIN リアルタイム雨量情報システム：<https://diasjp.net/service/xrain/>
 - 35) 田方 智，山越隆雄，栗原淳一，笹原克夫，桜庭雅明，高橋 秀，小野寺勝：新規細粒火山灰が堆積した流域における分布型流出解析モデルの検討，砂防学会誌，60 巻，4 号，pp.15-24，2007．

- 36) 大坂 剛，高橋英一，國友 優，山越隆雄，能和幸範，木佐洋志，石塚忠範，宇都宮玲，
横山康二，水山高久：桜島における土石流荷重計による単位体積重量測定，砂防学会誌，65
巻，6 号，pp.46-50，2013．
- 37) 奥田節夫：土石流の計測法に関する研究，京都大学防災研究所年報，15 号，A，pp.35-
41，1972．
- 38) 池田暁彦，水山高久，原口勝則：土石流の発生を支配する降雨量に関する考察，砂防学
会誌，60 巻，3 号，pp.26-31，2007．

A. 附錄

以下介紹分析案例時使用的分析模型程式，檔案輸入與輸出及視覺化程式Debris Flow Simulator for Sabo (DFSS)。程式操作環境係於OSGeo4W (<https://trac.osgeo.org/osgeo4w/>) 所建置GRASS GIS、Python、能操作GDAL的環境以及FORTRAN之程式編輯。

OSGeo4W之環境建置可選用軟體安裝程式「Advanced Installer」，選用其軟體套件及版本。

- GRASS GIS(7.8.6-1)
- Python(3.9.5-2)
- The GDAL/OGR Python3 Bindings and Scripts(3.3.1-1)
- Python plotting package(3.3.2-1)

FORTRAN程式編輯

- gfortran：參考MinGW-w64 - for 32與64位元Windows

(<https://sourceforge.net/projects/mingw-w64/files/>) 而利用x86_64-8.1.0-release-posix-seh-rt_v6-rev0.7z之軟體套件，但若是「Fortran90」之程式語言，應無問題。

A. 1. 寺內壩之演算法程序集「Terauchi_Dam」

文件夾之構成與各文件夾作業內容如下。

└01_SET_BASIN：演算領域設定與高程數據、流動方向數據之提取

└└01_RR_DR：降雨逕流模式（RR模型）與土石流運動模式（DR模型）共通

└└data_from_GSI：將國土地理院的數值高程模型（zip）轉換為tif

└└└grass：GRASS GIS的文件夾

└02_MK_TOPO：地形模型檔之製作

└└01_RR_DR：降雨逕流模式（RR模型）與土石流運動模式（DR模型）共通

└03_MK_RAIN：降雨數據檔之製作

└04_EXE_SIMU：演算程式之操作

└└01_RR_DR：降雨逕流模式（RR模型）與土石流運動模式（DR模型）共通

└05_MK_FIG：結果之視覺化

A. 1. 1 「01_SET_BASIN」文件夾

1. 作業內容

從國土地理院基礎地圖資訊下載服務所取得的數值高程模型，提取演算對象領域之數據。

2. 處理程式與文件夾之構成

└data_from_GSI：國土地理院的數值高程模型（zip）轉換為tif。分析時使用的DEM檔如下。
受著作權限制，並未一起綁定著作權。

fgddem.py(© 2012, Minoru Akagi)：將xml轉換為geotif。操作時把zip壓縮檔拖曳到
「fgddem.py.droptarget.bat」的圖標貼上。

FG-GML-5030-05-DEM10B.zip

FG-GML-5030-06-DEM10B.zip

FG-GML-5030-15-DEM10B.zip

FG-GML-5030-16-DEM10B.zip

└grass：GRASS GIS用的文件夾（以GRASS作成，只能在以下的GRASS應用）

JGD2011（搭配GSI的數據）

JGD2011_II（製作適合演算領域的座標系）

└└01_RR_DR

01_latlon.py（以GRASS GIS的文字碼操作）：第1次以「python3_01_latlon.py」（指令有時也可能是「python」）操作，讀取DEM檔並加以連結、輸出集水面積分布圖（acc_ll.tif）。如此就能取得對象流域末端的網格中心座標（緯度與經度）。第2次處理「python3_01_latlon.py_[經度]_[緯度]」（注意先後順序並非緯度_經度）。操作完再設定以十進制操作ddd.dddddd初始化所取得緯度經度（以下，[經度]

與[緯度]之初始化相同)為末端之流域並輸出(basin_ll.tif)。以此確認所設定之流域,若發現所設定並不正確,應取得流域末端之網格中心座標進行修正。02_xy.py(以GRASS GIS的文字檔操作):第1次以「python3_02_xy.py」操作後投影到平面直角座標系上,輸出acc_ll.tif。由此就能取得流域末端座標。此時數據已轉換為平面直角座標系,但流域末端座標為經度與緯度。第2次以「python3_02_xy.py_[經度]_[緯度]」進行操作,即可設定所取得緯度經度為末端之流域並叫出高程與流動方向之檔。空間解析度以02_xy.py內部定義的變數res進行指定(樣本為res=30m)。
dem_30m.asc(叫出):高程檔(以所設定之解析度製作)
dir_30m.asc(叫出):流動8方向檔(以所設定之解析度製作)

A. 1. 2 「02_MK_TOPO」文件夾

1) 作業內容

製作流域地形模型檔及河道地形模型檔。將「01_SET_BASIN」所輸出的高程檔與流動方向檔複製到「input」文件夾。

2) 處理程式與文件夾構成

└─01_RR_DR

01_mk_topographyFiles.f90:製作地形檔。於01.bat進行程式編輯建置執行。需要有能操作gfortran的環境。

02_mk_watershedConfigurationFiles.f90:製作流域地形模型檔。在02.bat進行程式編輯建置之操作。需要有能操作gfortran的環境。

03_mk_streamConfigurationFiles.f90:製作河道地形模型檔。在03.bat進行程式編輯建置。需有能操作gfortran的環境。

topographyConfiguration.txt:設定檔。於x@outlet、y@outlet以平面直角座標系輸入下游端之x與y座標。若為自然地形,可採用「01_SET_BASIN」所設定之流域末端位置平面直角座標系x與y值,但水壩流域的壩體與水面都已進行地形數據化,因此可視下游端處理狀況而定,演算之下游端可設定為水庫內部。

└─input

dem_30m.asc:高程檔

dir_30m.asc:流動8方向檔

└─output

targetArea_inRR.asc:演算對象領域檔

elevation_inRR.asc：高程檔

flowDir_inRR.asc：流下8方向檔

flowAcc_inRR.asc：集水網格數檔

controlVolume_centerPoint_inRR.txt：純量（無向量）計算點陣列編號檔

fluxPoint_x_inRR.txt：x 方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_xBoundary_inRR.txt：x 方向邊界點陣列編號檔

fluxPoint_y_inRR.txt：y 方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_yBoundary_inRR.txt：y 方向邊界點陣列編號檔

streamConfiguration_inRR.txt：河道構成檔

volcanicAsh_inRR.asc：火山灰厚度檔。權宜性地內容都在此製作0之檔。實際上有計算必要時另外處理。

Lmisc

dir_deg.txt：流下8方向確認檔

streamConfiguration_Checker.txt：河道網確認檔

streamOrder.asc：河溪（川）級序檔

A.1.3 「03_MK_RAIN」文件夾

1) 作業內容

利用透過國土交通省由DIAS取得的XRAIN數據製作分析程式用的降雨檔。

2) 處理程式與文件夾構成

LXRAIN_from_DIAS

201707040000-201707080000-10-FUK-130.7031-33.5000-130.8500-33.3688.zip：zip壓縮的csv檔群。
受著作權限制並未同時綁定。DIAS所要求的條件如下。

數據開始日期：2017/07/04 00:00、數據結束日期：2017/07/08 00:00

數據時間間隔：10 分鐘

領域西北端：33.5000N、130.7031E、領域西南端：33.3688N、130.8500E

每個檔所有的數據數目：南北 64、東西 48

檔案格式：CSV、壓縮格式：zip

01_mk_rain.py：雨量檔製作程式。執行本Python程式需先設定Python之執行環境。若執行01.bat，需先構建環境並執行程式。

targetArea_inRR.asc（輸入）：「02_MK_TOPO」所製作完成的計算對象領域檔

rain_time_201707040000_201707080000.txt（叫出）：計算領域範圍之降雨時間序列檔

A. 1. 4 「04_EXE_SIMU」文件夾

1) 作業內容

進行降雨逕流型態演算。

2) 處理程式與文件夾構成

└─01_RR_DR

RR.bat：於能執行gfortran的環境下進行程式編輯與建置及OpenMP執行緒（線程）數量設定，並執行程式。執行緒數量可改變。

RR_ver_1.0.f90：降雨逕流型態演算程式

RR_input.txt：模型設定檔

└─input：演算輸入檔群

→複製02_MK_TOPO¥01_RR_DR¥output的檔。

targetArea_inRR.asc：演算對象領域檔

elevation_inRR.asc：高程檔

flowDir_inRR.asc：流下8方向檔

flowAcc_inRR.asc：集水網格數檔

controlVolume_centerPoint_inRR.txt：純量（無向量）計算點陣列編號檔

fluxPoint_x_inRR.txt：x 方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_xBoundary_inRR.txt：x 方向邊界點陣列編號檔

fluxPoint_y_inRR.txt：y 方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_yBoundary_inRR.txt：y 方向邊界點陣列編號檔

streamConfiguration_inRR.txt：河道構成檔

volcanicAsh_inRR.asc：火山灰厚度檔

←複製02_MK_TOPO¥01_RR_DR¥output的檔。

rain_Terauchi.txt：演算領域範圍之降雨時間序列檔：應使用國土交通省所提供數據，因此內容與用「03_MK_RAIN」所製作者不同。

└─output_RR：結果檔群

res_1d_?????????.txt：各指定時間之一維河道檔

res_2d_*_?????????.asc：各指定時間與變數之二維平面檔

res_2d_hmax.asc：表面流之演算期間最大值

res_2d_hsmax.asc：滲流之演算期間最大值

└─output_misc：模型設定確認用的檔群

flowVolume_RRtoDR.txt（輸出）：由RR模型鏈接到DR模型的流量

A.1.5 「05_MK_FIG」文件夾

1) 作業內容

進行演算結果之視覺化。

2) 處理程式與文件夾構成

RR_out_hyeto.py：叫出以RR模型取得的流域平均雨量之降雨（雨量）歷線圖。

RR_out_hydro.py：叫出以RR模型取得的流量歷線圖。

操作本Python程式需設定Python之操作環境。若要操作01.bat應完成環境構建與程式操作。最後一行程式執行指令後面以間隔方式加上所要輸出的演算點編號。

A. 2. 櫻島有村川之演算法程序集「Arimura_Riv」

文件夾之構成與各文件夾的作業內容如下。

└01_SET_BASIN：演算領域之設定與高程數據、流動方向數據之提取

└└01_RR_DR：降雨逕流模式（RR模型）與土石流運動模式（DR模型）共通

└└data_from_GSI：將國土地理院的數值高程模型（zip）轉換為tif

└└└grass：GRASS GIS的文件夾

└02_MK_TOPO：地形模型檔之製作

└└01_RR_DR：降雨逕流模式（RR模型）與土石流運動模式（DR模型）共通

└03_MK_RAIN：降雨數據檔之製作

└04_EXE_SIMU：演算程式之操作

└└01_RR_DR：降雨逕流模式（RR模型）與土石流運動模式（DR模型）共通

└05_MK_FIG：結果之視覺化

A. 2. 1 「01_SET_BASIN」文件夾

1) 作業內容

從國土地理院基礎地圖資訊下載服務所取得的數值高程模型，提取演算對象領域之數據。

2) 處理程式與文件夾之構成

└data_from_GSI：將國土地理院的數值高程模型（zip）轉換為tif。分析時使用的DEM檔如下。受著作權限制，並未一起綁定著作權。

fgddem.py(© 2012, Minoru Akagi)：將xml轉換為geotif。操作時把zip壓縮檔拖曳到「fgddem.py.droptarget.bat」の的圖標貼上。

FG-GML-4730-24-DEM10B.zip

FG-GML-4730-25-DEM10B.zip

FG-GML-4730-34-DEM10B.zip

FG-GML-4730-35-DEM10B.zip

└grass：GRASS GIS 用的文件夾（以GRASS作成，只能在以下的GRASS應用）

JGD2011（搭配GSI的數據）

JGD2011_II（製作適合演算領域的座標系）

└└01_RR_DR

01_latlon.py(以GRASS GIS的文字碼操作)：第1次以「python3_01_latlon.py」（指令有時也可能是「python」）操作，讀取DEM檔並加以連結、輸出集水面積分布圖（acc_ll.tif）。如此就能取得對象流域末端的網格中心座標（緯度與經度）。第2次處理「python3_01_latlon.py_[經度]_[緯度]」（注意先後順序並非緯度_經度）操作完，再設定以為末端之流域並輸出（basin_ll.tif）。以此確認所設定之流域若發現所設定並不正確，應取得流域末端之網格中心座標然後進行修正。

02_xy.py (以GRASS GIS的文字檔操作)：第1次以「python3_02_xy.py」操作後投影到平面直角座標系上，輸出acc_1l.tif。由此就能取得流域末端座標。此時數據已轉換為平面直角座標系，但流域末端座標為經度與緯度。第2次以「python3_02_xy.py_ [經度]_[緯度]」進行操作，即可設定以所取得緯度經度為末端之流域並叫出高程與流動方向之檔。空間解析度以02_xy.py內部定義的變數res進行指定(樣本為res=10 m)。

dem_10m.asc (叫出)：高程檔(以所設定之解析度製作)

dir_10m.asc (叫出)：流動8方向檔(以所設定之解析度製作)

A. 2. 2 「02_MK_TOPO」文件夾

1) 作業內容

製作流域地形模型檔及河道地形模型檔。將「01_SET_BASIN」所叫出的高程檔與流動方向檔複製到「input」文件夾。

2) 處理程式與文件夾構成

└─01_RR_DR

01_mk_topographyFiles.f90：製作洪氾平原地形檔。於01.bat進行程式編輯建置。需要能有操作gfortran的環境。

02_mk_watershedConfigurationFiles.f90：製作與河道進行空間結合的檔。在02.bat進行程式編輯建置之操作。需要能有操作gfortran的環境。

03_mk_03_mk_streamConfigurationFiles_Arimura.f90：製作河道地形模型檔。在03.bat進行程式編輯建置。需有能操作gfortran的環境。只針對有村川的主流段進行演算，因而上道上游端的檢測需進行特別的處理。

topographyConfiguration.txt：設定檔。x@outlet、y@outlet 以平面直角座標系輸入下游端之x與y座標。

└─input

dem_10m.asc：高程檔

dir_10m.asc：流動8方向檔

└─output

targetArea_inRR.asc：演算對象領域檔

elevation_inRR.asc：高程檔

flowDir_inRR.asc：流動8方向檔

flowAcc_inRR.asc：集水網格數檔

controlVolume_centerPoint_inRR.txt：純量（無向量）計算點陣列編號檔

fluxPoint_x_inRR.txt：x 方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_xBoudary_inRR.txt：x 方向邊界點陣列編號檔

fluxPoint_y_inRR.txt：y 方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_yBoudary_inRR.txt：y 方向邊界點陣列編號檔

streamConfiguration_inRR.txt：河道構成檔

volcanicAsh_inRR.asc：火山灰厚度檔。權宜性地內容都在此製作0之檔。實際上有計算必要時另外處理。

└misc

dir_deg.txt：流下8方向確認檔

streamConfiguration_Checker.txt：河道網確認檔

streamOrder.asc：河溪（川）級序檔（Horton–Strahler）

A. 2. 3 「03_MK_RAIN」文件夾

1) 作業內容

製作不設定降雨而設定來自上游端一定流量流入的檔案。

2) 處理程式與文件夾構成

01_mk_fv.py：流量做成檔案雨量檔案做成程式。操作本Python程式需設定Python之操作環境。若要操作01.bat，應完成環境構建與程式操作。

streamConfiguration_inRR.txt（輸入）：以「02_MK_TOPO」作成之檔案。

flowVolume_RRtoDR.txt（叫出）：計算時所使用的來自上游端之流量數據。

A. 2. 4 「04_EXE_SIMU」文件夾

1) 作業內容

進行土石流運動型態演算。

2) 處理程式與文件夾構成

└─01_RR_DR

DR.bat：於能執行gfortran的環境下進行程式編輯建置及OpenMP執行緒（線程）數量設定，並執行程式。執行緒數量可改變。

DR_ver_1.0.f90：土石流運動型態演算程式

DR_input.txt：模型設定檔

└─input：演算輸入檔群

→複製02_MK_TOPO¥01_RR_DR¥output的檔。

streamConfiguration_inRR.txt：河道構成檔案

←複製02_MK_TOPO¥01_RR_DR¥output的檔。

└─output_DR：結果檔案群

res_?????????.txt：每個指定時間的一維河道檔

flowVolume_RRtoDR.txt（輸入）：鏈接到RR-DR模型的流量。以「03_MK_RAIN」製作完成。

flowVolume_ws_DRtoDF.txt（輸出）：鏈接到DR-DF模型（水、粗粒泥沙與細粒泥沙）

flowVolume_cs_DRtoDF.txt（輸出）：鏈接到DR-DF模型（粗粒泥沙）

flowVolume_fs_DRtoDF.txt（輸出）：鏈接到DR-DF模型（細粒泥沙）

A. 2. 5 「05_MK_FIG」文件夾

1) 作業內容

進行演算結果之視覺化。

2) 處理程式與文件夾構成

DR_out_hu.py：叫出以DR模型取得的土石流運動深度與流速。

DR_out_cc.py：叫出以DR模型取得的粗粒土砂濃度。

操作本Python程式需設定Python之操作環境。若要操作01.bat應完成環境構建與程式操作。最後一行程式執行，後面以間隔方式加上叫出演算點編號。

A. 3. 阿蘇古惠川之演算法程式集「Furuegawa_Riv」

文件夾之構成與各文件夾的作業內容如下。

- └01_SET_BASIN：演算領域設定與高程數據、流動方向數據之提取
 - └01_RR_DR：降雨逕流模式（RR模型）與土石流運動模式（DR模型）共通
 - └02_DF：土石流氾濫模式（DF模型）
 - └data_from_GSI：將國土地理院的數值高程模型（zip）轉換為tif
 - └grass：GRASS GIS的文件夾
- └02_MK_TOPO：地形模型檔之製作
 - └01_RR_DR：降雨逕流模式（RR模型）與土石流運動模式（DR模型）共通
 - └02_DF：土石流氾濫模式（DF模型）
- └03_MK_RAIN：降雨數據檔之製作
- └04_EXE_SIMU：演算程式之操作
 - └01_RR_DR：降雨逕流模式（RR模型）與土石流運動模式（DR模型）共通
 - └02_DF：土石流氾濫模式（DF模型）
- └05_MK_FIG：結果之視覺化

A. 3. 1 「01_SET_BASIN」文件夾

1）作業內容

從國土地理院基礎地圖資訊下載服務所取得的數值高程模型，提取演算對象領域之數據。

2）處理程式與文件夾構成

└data_from_GSI：將國土地理院的數值高程模型（zip）轉換為tif。分析所使用的DEM檔如下。受著作權限制，並未一起綁定著作權。

fgddem.py(© 2012, Minoru Akagi)：將xml轉換為geotif。操作時把zip壓縮檔拖曳到「fgddem.py.droptarget.bat」的圖標貼上。

FG-GML-4931-20-DEM10B.zip

FG-GML-4931-21-DEM10B.zip

FG-GML-4931-30-DEM10B.zip

FG-GML-4931-31-DEM10B.zip

└grass：GRASS GIS用的文件夾（以GRASS作成，只能在以下的GRASS應用）

JGD2011（搭配GSI的數據）

JGD2011_II（製作適合演算領域的座標系）

└01_RR_DR

01_latlon.py(以GRASS GIS的文字碼操作)：第1次以「python3_01_latlon.py」

（指令有時也可能是「python」）操作，讀取DEM檔並加以連結、叫出集水面積分佈圖（acc_ll.tif）。由此就能取得對象流域末端的網格中心座標（緯度與經度）。

第2次處理「python3_01_latlon.py_[經度]_[緯度]」（注意先後順序並非緯度_經度）。操作完再設定以所取得的緯度與經度為末端的流域並輸出（basin_ll.tif）。確認以此方式設定的流域，若發現設定不當，從流域末端網格中心座標的取得部分重新修正。

02_xy.py（以GRASS GIS的文字檔操作）：第1次以「python3_02_xy.py」操作後投影到平面直角座標系上，輸出acc_ll.tif。如此就能取得流域末端座標。此時數據已轉換為平面直角座標系，但流域末端座標為經度與緯度。第2次以「python3_02_xy.py_經度_緯度」進行操作，即可設定以所取得緯度經度為末端之流域並叫出高程與流動方向之檔。空間解析度以02_xy.py內部定義的變數res進行指定（樣本為res=30 m）。

dem_30m.asc（叫出）：高程檔（以所設定之解析度製作）

dir_30m.asc（叫出）：流動8方向檔（以所設定之解析度製作）

L02_DF

02_xy_01.py（以GRASS GIS的文字檔操作）：以「python3_02_xy_01.py」操作後設定area.shp領域，叫出高程及流動方向檔案。空間解析度以02_xy_01.py內部所定義之變數res進行指定（樣本為res=10 m）。

area.shp（輸入）：氾濫範圍指定檔案（以GIS檔製作）之土石流氾濫量乃是以RR模型及DR模型演算，因此製作成包含這些領域（沒有必要全部加以涵括）。

basin_10m.asc（叫出）：演算對象領域檔

dem_10m.asc（叫出）：高程檔（以所設定之解析度作成）

dir_10m.asc（叫出）：流動8方向檔（以所設定之解析度作成）

A.3.2「02_MK_TOPO」文件夾

1) 作業內容

製作流域地形模型檔及河道地形模型檔。將「01_SET_BASIN」所叫出的高程檔與流動方向檔複製到「input」文件夾。

2) 處理程式與文件夾構成

└01_RR_DR

01_mk_topographyFiles.f90：製作地形檔。於01.bat進行程式編輯建置。需要有能操作gfortran的環境。

02_mk_watershedConfigurationFiles.f90：製作流域地形模型檔。在02.bat進行程式編輯建置之操作。需要有能操作gfortran的環境。

03_mk_streamConfigurationFiles.f90：製作河道地形模型檔。在03.bat進程式編輯建置。

需有能操作gfortran的環境。

topographyConfiguration.txt：設定檔。x@outlet、y@outlet以平面直角座標系輸入下游端之x與y座標。

└input

dem_30m.asc：高程檔

dir_30m.asc：流動8方向檔

└output

targetArea_inRR.asc：演算對象領域檔

elevation_inRR.asc：高程檔

flowDir_inRR.asc：流動8方向檔

flowAcc_inRR.asc：集水網格數檔

controlVolume_centerPoint_inRR.txt：純量（無向量）計算點陣列編號檔

fluxPoint_x_inRR.txt：x方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_xBoudary_inRR.txt：x方向邊界點陣列編號檔

fluxPoint_y_inRR.txt：y方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_yBoudary_inRR.txt：y方向邊界點陣列編號檔

streamConfiguration_inRR.txt：河道構成檔

volcanicAsh_inRR.asc：火山灰厚度檔。權宜性地內容都在此製作0之檔。實際上有演算必要時另外處理。

└misc

dir_deg.txt：流下8方向確認檔

streamConfiguration_Checker.txt：河道網確認檔

streamOrder.asc：河溪（川）級序檔（Horton–Strahler）

└02_DF

01_mk_floodplainConfigurationFiles.f90：製作洪氾平原地形檔。於01.bat進程式編輯建置。需有能操作gfortran的環境。

02_mk_streamFloodplainConectionFiles.f90：製作與河道進行空間結合的檔。在02.bat進程式編輯建置。需有能操作gfortran的環境。

topographyConfiguration.txt：設定檔

└input（輸入）

basin.asc：演算對象領域檔

dem.asc：高程檔

dir.asc：流動8方向檔

streamConfiguration_inRR.txt：以01_RR_DR作成的數據

└output

targetArea_inDF.asc：演算對象領域數據

elevation_inDF.asc：高程數據

flowDir_inDF.asc：最陡坡降8方向數據

controlVolumeCenterPoint_inDF.txt：純量計算點陣列編號數據

fluxPoint_xBoudary_inDF.txt：x 方向邊界點陣列編號數據

fluxPoint_x_inDF.txt：x 方向向量計算點陣列編號數據

fluxPoint_yBoudary_inDF.txt：y 方向邊界點陣列編號數據

fluxPoint_y_inDF.txt：y 方向向量計算點陣列編號數據

fluxPoint_eBoudary_inDF.txt：x 方向（東側）邊界點陣列編號數據

fluxPoint_nBoudary_inDF.txt：y 方向（北側）邊界點陣列編號數據

fluxPoint_sBoudary_inDF.txt：-y 方向（南側）邊界點陣列編號數據

fluxPoint_wBoudary_inDF.txt：-x 方向（西側）邊界點陣列編號數據

streamFloodplainConnection.txt：製作與河道空間結合之檔案

d.asc：堆積厚度數據*

hs_ini.asc：滲流水深數據*

*在此全部內容指權宜製作0之檔。若有必要實際演算，則另外準備。但檔案標題資訊與此處所作者相同。

A. 3. 3 「03_MK_RAIN」文件夾

1) 作業內容

依據阿蘇乙姬地域氣象觀測系統1990年7月2日數據作成分析程式用的降雨數據。

2) 處理程式

無特別的程式。可遵從格式製作rain_Aso.txt。

A.3.4 「04_EXE_SIMU」文件夾

1) 作業內容

進行降雨逕流型態演算。

2) 處理程式與文件夾構成

└─01_RR_DR

RR.bat：在能執行gfortran的環境下進行程式編輯建置及OpenMP執行緒（線程）數量設定，並執行程式。執行緒數量可改變。

RR_ver_1.0.f90：降雨逕流型態演算程式

RR_input.txt：模型設定檔

└─input：演算輸入檔群

→複製02_MK_TOPO\01_RR_DR\output的檔。

targetArea_inRR.asc：計算對象領域檔

elevation_inRR.asc：高程檔

flowDir_inRR.asc：流動8方向檔

flowAcc_inRR.asc：集水網格數檔

controlVolume_centerPoint_inRR.txt：純量（無向量）計算點陣列編號檔

fluxPoint_x_inRR.txt：x方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_xBoundary_inRR.txt：x方向邊界點陣列編號檔

fluxPoint_y_inRR.txt：y方向向量計算點陣列編號檔

fluxPoint_yBoundary_inRR.txt：y方向邊界點陣列編號檔

streamConfiguration_inRR.txt：河道構成檔

volcanicAsh_inRR.asc：火山灰厚度檔

←複製02_MK_TOPO\01_RR_DR\output的檔。

rain_Aso.txt：演算領域範圍之降雨時間序列檔：以03_MK_RAIN作成

└─output_RR：結果檔群

res_1d_?????????.txt：各指定時間之一維河道檔

res_2d_*_?????????.asc：各指定時間與變數之二維平面檔

res_2d_hmax.asc：表面流之演算期間最大值

res_2d_hsmax.asc：滲流之演算時間最大值

└─output_misc：模型設定確認用的檔群

flowVolume_RRtoDR.txt（輸出）：由RR模型剪接到DR模型的流量

DR.bat：在能執行gfortran的環境下進行程式編輯建置及OpenMP執行緒（線程）數量設定，並執行程式。執行緒數量可改變。

DR_ver_1.0.f90：土石流運動型態演算程式

DR_input.txt：模型設定檔

└─input：演算輸入檔群

→複製02_MK_TOPO¥01_RR_DR¥output的檔。

streamConfiguration_inRR.txt：河道構成檔案

←複製02_MK_TOPO¥01_RR_DR¥output的檔。

└─output_DR：結果檔案群

res_?????????.txt：各指定時間之一維河道檔

flowVolume_RRtoDR.txt（輸入）：鏈接到RR-DR模型的流量。以「03_MK_RAIN」製作完成。

flowVolume_ws_DRtoDF.txt（輸出）：鏈接到DR-DF模型（水、粗粒泥沙與細粒泥沙）

flowVolume_cs_DRtoDF.txt（輸出）：鏈接到DR-DF模型（粗粒泥沙）

flowVolume_fs_DRtoDF.txt（輸出）：鏈接到DR-DF模型（細粒泥沙）

└─02_DF

DF.bat：在能執行gfortran的環境下進行程式編輯建置及OpenMP執行緒（線程）數量設定，並執行程式。執行緒數量可改變。

DF_ver_1.0.f90：土石流堆積計算程式

DF_input.txt：模型設定檔

└─input：演算輸入檔群

→複製02_MK_TOPO¥02_DF¥output的檔。

targetArea_inDF.asc：演算對象領域數據

elevation_inDF.asc：高程數據

flowDir_inDF.asc：最陡坡降8方向數據

controlVolumeCenterPoint_inDF.txt：純量計算點陣列編號數據

fluxPoint_xBoudary_inDF.txt：x方向邊界點陣列編號數據

fluxPoint_x_inDF.txt：x方向向量計算點陣列編號數據

fluxPoint_yBoudary_inDF.txt：y方向邊界點陣列編號數據

fluxPoint_y_inDF.txt：y方向向量計算點陣列編號數據

fluxPoint_eBoudary_inDF.txt：x方向（東側）邊界點陣列編號數據

fluxPoint_nBoudary_inDF.txt：y方向（北側）邊界點陣列編號數據

fluxPoint_sBoudary_inDF.txt：-y方向（南側）邊界點陣列編號數據

fluxPoint_wBoudary_inDF.txt：-x方向（西側）邊界點陣列編號數據

streamFloodplainConnection.txt：製作與河道空間結合之檔案

d.asc：堆積厚度數據

hs_ini.asc：滲流水深數據

←複製02_MK_TOPO與02_DF的output的檔。

→複製01_RR_DR的DR模型演算結果檔。

flowVolume_ws_DRtoDF.txt

flowVolume_cs_DRtoDF.txt

flowVolume_fs_DRtoDF.txt

←複製01_RR_DR的DR模型演算結果檔。

streamConfiguration_inRR.txt（與RR模型、DR模型共通）

rain_Aso.txt（與RR模型共通）

└─output_DF：結果檔群

res_*_?????????.asc：各指定時間與變數之二維平面數據檔

res_hmax.asc：流動深度之最大值

A.3.5 「05_MK_FIG」文件夾

1) 作業內容

進行演算結果之視覺化。

2) 處理程式與文件夾構成

RR_out_hyeto.py：叫出以RR模型取得的流域平均雨量之降雨（雨量）歷線圖。

RR_out_hydro.py：叫出以RR模型取得的流量歷線圖。

DR_out_hydro.py：叫出以DR模型所取得的水+土砂、粗粒土砂與細粒土砂之雨量圖。

操作本Python程式需設定Python之操作環境。若要操作01_RR.bat，應完成「RR_out_hyeto.py」及「RR_out_hydro.py」之環境構建與程式操作，操作02_DR.bat時，可操作「DR_out_hydro.py」。最後一行程式執行指令後面以間隔方式加上所要輸出的演算點編號。

└─mk_map：將DR模型之演算結果映射（配置）到平面上。

map.py：將DR模型之演算結果映射（配置）到平面上。

qmax.asc：演算期間之流量最大值

hmax.asc：演算期間之流動深度最大值

umax.asc：演算期間之流速最大值

dz.asc：演算結束時的侵食與堆積深度

r_prof.py：叫出DR模型演算結果之縱斷面圖。

└─mk_vtk：以RR、DR與DF模型之輸出內容作成vtk檔。

vtk_line_RR.py：DR之線向量的製作程式

vtk_line_DR.py：DR之線向量檔的製作程式

vtk_cell_DF.py：製作RR及DF點陣圖檔的程式分別操作RR.bat、DR.bat、DF.bat時，應完成「vtk_line_RR.py」、「vtk_line_DR.py」、「vtk_cell_DF.py」之環境構建與程式操作。最後一行程式執行指令後面以間隔的方式加上所要輸出的時間間隔（秒）。

└out：所完成vtk檔之保存地點

編譯：農業部農村發展及水土保持署

Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation

January 2024

本文件之翻譯及轉載，均符合日本著作權法相關規定。