

# 基於 GPU 之高性能水動力模式之淹水模擬 評比：以康芮颱風為例

## Inundation Simulation Assessment of Two GPU-based High-Performance Hydrodynamic Models: A Case Study of Typhoon Kong-Rey

國立中興大學土木工程學系

研究生  
曾麟哲  
Lin-Che Tseng

教授  
陳佳正  
Chia-Jeng Chen

### 摘要

氣候變遷的影響可導致極端降雨事件發生的頻率日益上升，近年來已造成臺灣各地區多起洪水重大災害與損失，為因應突發性洪災事件之即時模擬需求，需採用具備高解析度與高運算效能之模式，以提升模擬準確性與效率，故本研究採用高性能水動力模式作為主要工具。並以 2024 年的康芮颱風作為研究案例，並以全臺灣地區做為研究區域來進行模擬與分析，比較兩個二維淺水方程式模型 Simulation Environment for Geomorphology, Hydrodynamics, and Ecohydrology in Integrated (SERGHEI) 為一套由德國 Forschungszentrum Jülich 的 Simulation and Data Lab Terrestrial Systems 及 IBG-3 Agrosphere 研究團隊所開發之洪水模型以及 Two-dimensional Runoff Inundation Toolkit for Operational Needs (TRITON) 為美國橡樹嶺國家實驗室 Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 與田納西理工大學 Tennessee Technological University 合作開發，比較兩個模式於相同事件下之模擬結果。SERGHEI 是採用 Kokkos 的架構，支援多核心 CPU 與 GPU 平行運算，並能夠將入滲條件作為輸入，能夠模擬出更準確之結果。TRITON 是首個支援多處理器與多顯卡運算架構的洪水模式，透過 CUDA、OpenMP 等平行計算技術，能有效處理大尺度與長時間的淹水模擬。本研究將透過模擬結果之淹水深度、淹水範圍、計算效能以及評估指標等進行綜合比較與分析，作為後續洪災模擬模式選擇之依據。

關鍵詞：SERGHEI、TRITON、淺水方程式

### Abstract

The impact of climate change may lead to an increasing frequency of extreme rainfall events. In recent years, severe flooding and disaster losses have occurred across various regions of Taiwan. In order to respond to such disaster-prone flood events, it is necessary to adopt high-resolution models with analytical capability and high

computational efficiency, so as to improve simulation accuracy and stability. Therefore, this study uses high-performance hydrodynamic models as the main tools. Taking Typhoon Kong-Rey in 2023 as the research case, the Taiwan area is used as the study area to conduct simulation and analysis, comparing two-dimensional shallow water models. The Simulation Environment for Geomorphology, Hydrodynamics, and Ecohydrology in Integrated (SERGHEI) is a model developed by the Simulation and Data Lab Terrestrial Systems and IBG-3 Agrosphere research team at Forschungszentrum Jülich in Germany. The Two-dimensional Runoff Inundation Toolkit for Operational Needs (TRITON) is a flood model developed by Oak Ridge National Laboratory (ORNL) in the United States in collaboration with Tennessee Technological University. The simulation results of the two models under the same event are compared. SERGHEI uses the Kokkos framework, supports parallel computing on both CPU and GPU, and allows the input of infiltration conditions, thereby simulating more accurate results. TRITON is the first open-source flood model that supports multi-processor and multi-architecture operation. Through CUDA and OpenMP computing technology, it can efficiently handle large-scale and long-duration flood simulations. This study uses the simulation results to conduct comparative analysis in terms of flood depth, flood extent, and computational efficiency, as a reference for selecting flood simulation models in the future.

Keywords: SERGHEI, TRITON, shallow water equation

## 一、前言

近年來氣候變遷加劇，導致極端降雨事件的發生頻率與強度上升，導致臺灣地區因多起洪水事件造成重大災害與損失，為應對極端降雨以及現代環境中水文模型變的物理化 Caviedes-Voullième et al. (2023)利用 Simulation EnviRonment for Geomorphology, Hydrodynamics, and Ecohydrology in Integrated (SERGHEI)框架下開發的 SERGHEI-SWE，其研究結果顯示 SERGHEI 具有高擴展率與高效能計算，於各試驗中也展現其高精度與穩定性。此外 Morales-Hernández et al. (2021)針對 Two-dimensional Runoff Inundation Toolkit for Operational Needs (TRITON)進行 GPU 加速應用評估，證實該模型在大範圍洪水模擬中能顯著縮短計算時間，展現其於災前預警與快速應變的應用潛力。與 SERGHEI 注重架構通用性與模組彈性不同，TRITON 的更聚焦於大規模洪水模擬的即時計算效率。綜上所述，過去文獻已展現新一代高效能水文水理模擬平台在不同應用場景中的潛力。然而，目前針對臺灣地區極端降雨情境下，仍缺乏系統性比較兩者於極端降雨下淹水模擬的適用性與效能差異。因此，本研究將以臺灣地區為研究區域，比較 SERGHEI 與 TRITON 兩套高效能模擬工具，探討其於極端降雨下之淹水模擬表現，以提供未來防災決策與模式選擇之參考依據。

## 二、研究區域與資料

### 2.1 研究區域

本研究以臺灣本島為研究區域(如圖 2-1)，所使用之降雨資料與土地利用資料(詳如 2.2 至 2.3 節)。臺灣地區地形陡峻且降雨強度大，近年來極端降雨事件造成重大淹水災害，因此選擇全臺灣作為研究範圍，能更全面檢視不同地形與土地利用條件下之淹水模擬表現。

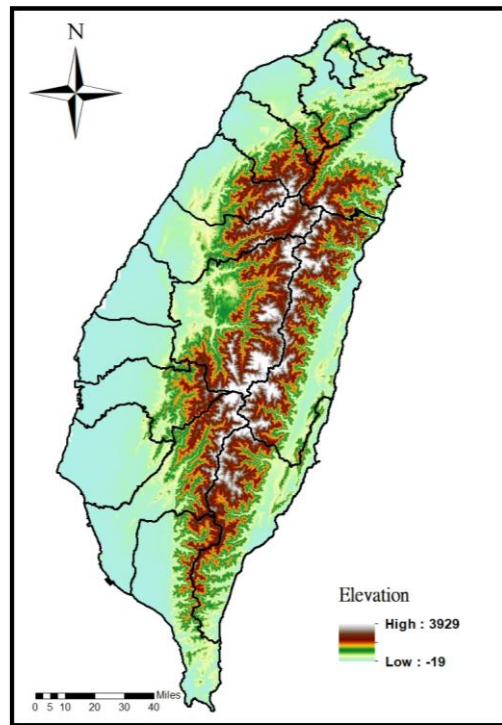


圖 2-1 研究區域

### 2.2 降雨量資料

本研究採用之降雨資料為中央氣象署(Central Weather Administration, CWA)與美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)共同開發建置之劇烈天氣監測系統(QPESUMS)，結合氣象雷達、雨量站等多元觀測資料及地利資訊系統，資料由最低仰角合成回波(Mosaic Hybrid Scan Reflectivity)利用回波(Z)與降雨率(R)間之關係式取得之降雨估算(Cheng et al., 2021)，經雨量站觀測修正後，產生降雨估計的格點化整合產品，時空解析度為(0.0125°和 10 分鐘)。

### 2.3 土地利用資料

本研究土地利用資料採用內政部國土測繪中心(National Land Surveying and Mapping Center, NLSC)公佈之 2015 年土地利用數據，此數據透過高解析度航拍影像、地籍圖、台灣通用電子地圖等多種參考圖資，並結合部分外業調查，全面且持續地調查土地利用現況的變化，以便進行合理的土地利用規劃，NSLC 將全臺土地利用型態分為十類，分別是都市和建地(Urban)、旱田(Dryland)、水田

(Irrigated Cropland)、草地(Grassland)、荒地(Shrubland)、墓地(Mixed Shrubland)、林地(Mixed Shrubland)、水體(Water Bodies)、濕地(Wetland)及裸露地(Barren)(如圖 2-2)。

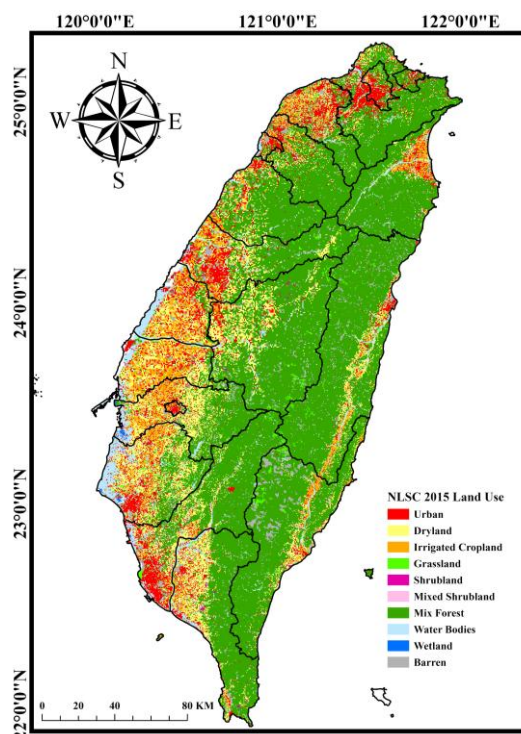


圖 2-2 臺灣本島土地利用資料

### 三、研究方法

#### 3.1 TRITON 模式

本研究中使用了 TRITON 模式，為一新興開源之二維水動力模式，主要能夠利用高效能運算(High Performance Computing, HPC)，運算效率相較於傳統水理模式提升許多。TRITON 的主要輸入包括數值高程模型(DEM)、表面粗糙度(曼寧 n 值)、入流點與對應之流量時間序列。此外，TRITON 能夠通過局部逕流(即有效降雨)流入，對於淹水模擬相當重要，以及有多種邊界可選擇。模型之控制方程式為淺水波方程式(Shallow water equations)，其公式如下：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S_r + S_b + S_f$$

$$U = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}$$

$$S_r = \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, S_b = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z}{\partial x} \\ -gh \frac{\partial z}{\partial y} \end{bmatrix}, S_f = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{gh^2}{7} q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \\ \frac{gh^2}{7} q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \end{bmatrix}$$

其中， $h$  為水深， $q_x$  為  $x$  方向上之單位流量， $q_y$  為  $y$  方向之單位流量， $z$  為地形高程， $g$  為重力加速度， $S_r$  為逕流率， $S_b$  為底床坡度， $S_f$  為摩擦坡降， $n$  為曼寧粗糙係數。

### 3.2 SERGHEI 模式

本研究中使用 SERGHEI-SWE 模式，該框架採用 Kokkos 的架構，並且支持 CUDA、OpenMP、HIP 等作為後端，使得模擬能夠在不同的硬體平台上且跨尺度的進行，相較於 TRITON 有入滲條件可做為資料輸入，適用於地形複雜、條件多變的模擬。與 TRITON 模式不同處是逕流率  $S_r = r - r_f$ ，包含了入滲量，以及摩擦模型的選擇上，能夠選擇 Manning、Chezy、Darcy-Weisbach 三種摩擦模型。

## 四、初步成果

目前已將定量降雨作為雨量輸入放入兩套模式中，模擬結果(如圖 4-1)，兩者的差異可能是邊界條件的設置不同所導致淹水深度，SERGHEI 為自由邊界而 TRITON 為給定坡度的正常邊界。

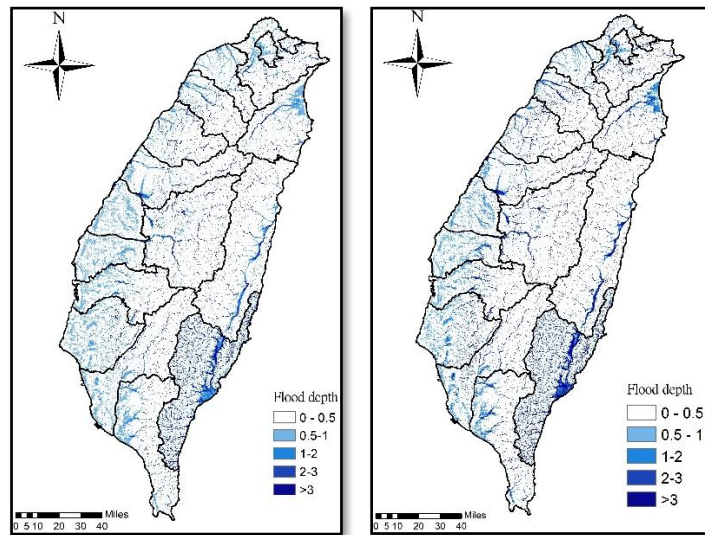


圖 4-1 650mm/24hr 全臺定量降雨；(a)SERGHEI、(b)TRITON

本研究以康芮颱風作為颱風事件之選擇，並以前述之 QPESUMS 作為降雨資料輸入，圖 4-2 b 圖為康芮颱風於 TRITON 模擬結果，將全臺灣以  $0.0125^\circ$  進行區域切割，以流域進行切割，並以臺南市作為範例(如圖 4-2-a)，並在每一網格放入對應的雨量資料。

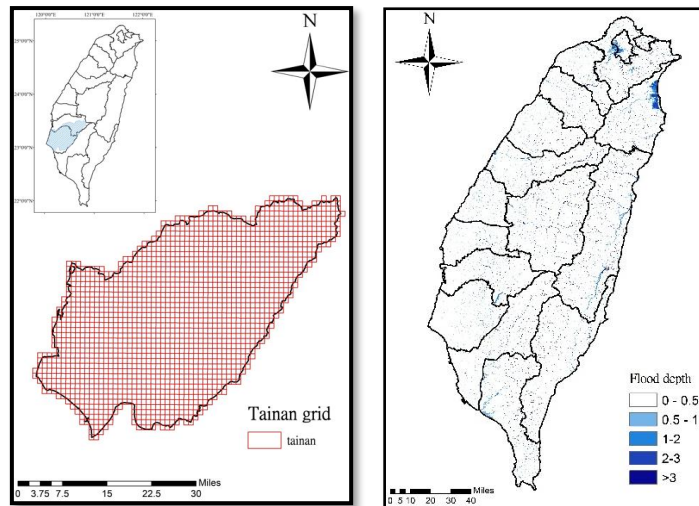


圖 4-2 (a)TRITON 網格切分以臺南為例、(b)康芮颱風全臺最大淹水深度圖

## 五、小結與後續工作

截至目前，本研究已能以單一定量降雨作為輸入，分別於 TRITON 與 SERGHEI 兩套水理模式進行淹水模擬(圖 4-1)。此外，本研究已於 TRITON 以 QPESUMS 雷達格點降雨作為時降雨強迫，完成變量淹水模擬；SERGHEI 部分仍在建置與熟悉流程中，尚未完成相同設定之執行。日後將完成 SERGHEI 之區域切分與相關設定，導入對應的格點雨量，使其能與 TRITON 在一致條件下產生可比對結果，進而以常用評估指標(如 NSE、KGE、RMSE 等)比較兩模式表現，選擇較優方案以應對洪災應用。同時，將擴充颱風個案數，蒐集可用於驗證之測站(雨量、水位與淹水觀測)資料，持續檢驗與修正模型，並逐步建置標準化的淹水模擬資料庫(含輸入、參數、輸出與評分指標)，以支援後續情境分析與決策。

## 參考文獻

1. Morales-Hernández, M., Sharif, M.B., Kalyanapu, A., Ghafoor, S.K., Dullo, T.T., Gangrade, S., Kao, S.-C., Norman, M.R., and Evans, K.J., 「TRITON: A Multi-GPU open source 2D hydrodynamic flood model」, Environmental Modelling & Software, Vol.146, pp.105206, 2021.
2. Caviedes-Voullième, D., Morales-Hernández, M., Norman, M.R., and Özgen-Xian, I., 「SERGHEI (SERGHEI-SWE) v1.0: a performance-portable high-performance parallel-computing shallow-water solver for hydrology and environmental hydraulics」, Geoscientific Model Development, Vol.16, pp.977–1008, 2023.
3. Gangrade, S., Ghimire, G.R., Kao, S.-C., Morales-Hernández, M., Tavakoly, A.A., Gutenson, J.L., Sparrow, K.H., Darkwah, G.K., Kalyanapu, A.J., and Follum, M.L., 「Unraveling the 2021 Central Tennessee flood event using a hierarchical multi-model inundation modeling framework」, Journal of Hydrology, Vol.620,

pp.129579, 2023.

4. Cheng, P.L., Zhang, J., Tang, Y.S., Tang, L., Lin, P.F., Langston, C., Kaney, B., Chen, C.R., and Howard, K., “An Operational Multi-Radar Multi-Sensor QPE System in Taiwan”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 102, 3, 2021.