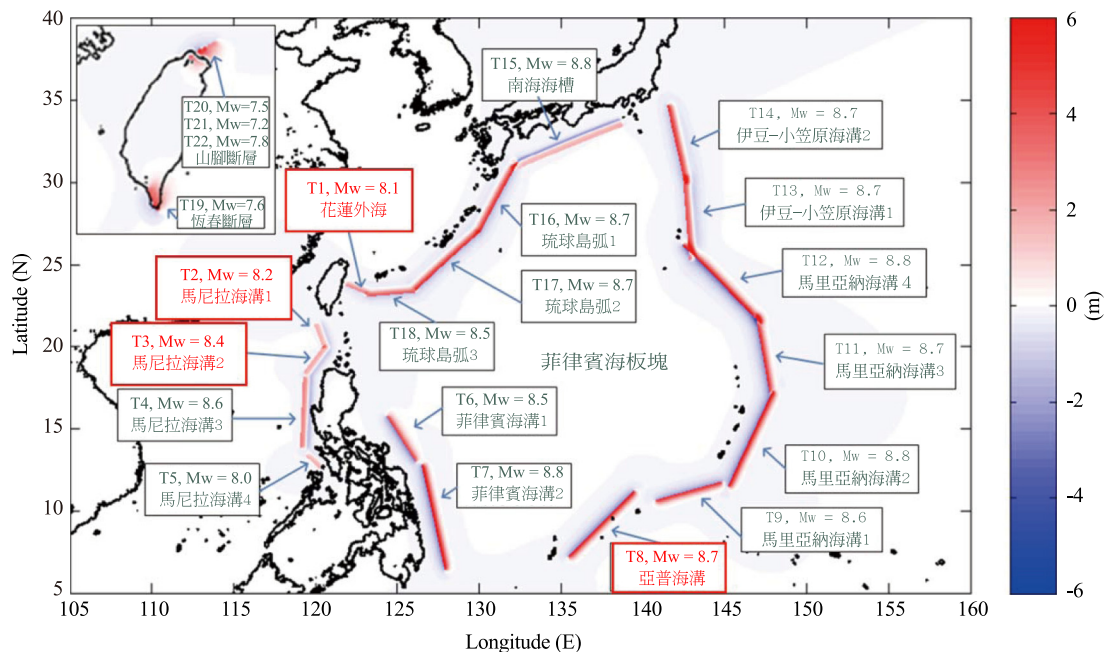


台灣的海嘯研究與發展

國立中央大學水文與海洋科學研究所 吳祚任

2011年3月11日，日本宮城大地震引發海嘯，災情震撼全球，而後續的核電災變至今仍無法徹底解決。台灣四面環海，天然環境甚至人文環境都與日本類似，透過不斷的災區畫面播送，

讓台灣人產生同情與共鳴。也因如此，台灣自此開始重視海嘯的威脅，也希望透過科學的研究，減少台灣的海嘯災害。



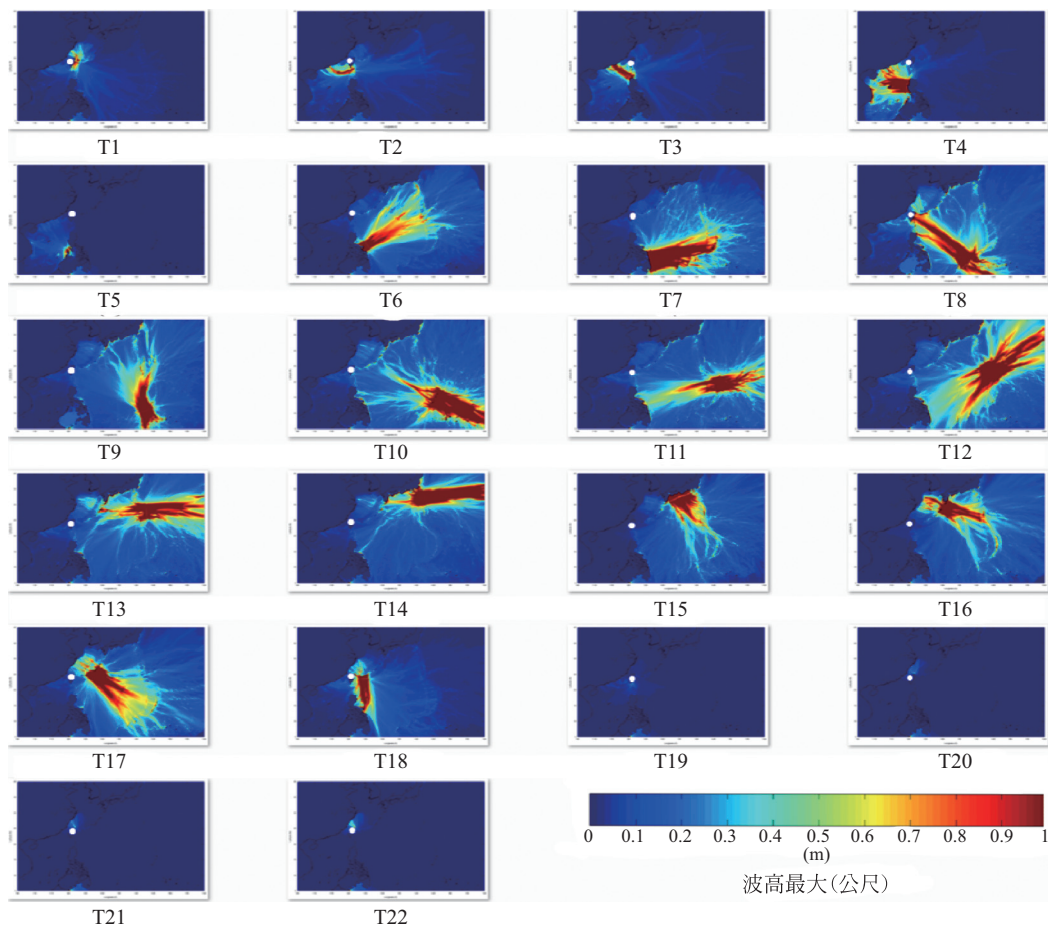
圖一 18 個海溝型海嘯源與 4 個斷層型海嘯源。

為達此目的，在 311 日本海嘯事件後，科技部（當時稱國科會）緊急啟動一應科方案，由筆者擔任主持人，探討台灣潛在大規模海溝型海嘯之威脅。在該計畫中，透過與地震及地質界之學者與專家深入討論，對台灣周圍海溝擬定 18 個海溝型海嘯源，並針對南北之核電廠，擬定 4 個斷層型海嘯源（圖 1）。該計畫之重點於以台灣現有之海底地質與地形資料為基礎，配合最新之 Source-Scaling Relationship 訂定地震參數，並採用知名的 COMCOT 海嘯模式，進行高解析度非線性且包含溢淹的情境海嘯模擬，所得之成果包括最大波高、溢淹範圍等重要資訊，可成為海

嘯災防之參考重點（圖 2）[11, 18, 20-22]。

該計畫執行得相當成功，不僅透過大量情境模擬，了解台灣主要之海嘯威脅主要來自花蓮外海(T1)、馬尼拉海溝北段(T2, T3)、以及亞普海溝(T8)等潛在海溝型地震所引發之海嘯，也使核電廠之海嘯防範有所依據。也由於此計畫之成功，包括聯合國教科文組織 UNESCO、中國、香港、越南、菲律賓等國皆以此研究成果作為海嘯災防之重要參考[1, 3, 9, 12, 16]。

但該計畫受限於時間因素，僅針對海溝型海嘯加以探討。然而台灣周邊仍存在諸多不同來源之海嘯機制，最明顯之案例為 1867 年的基隆海



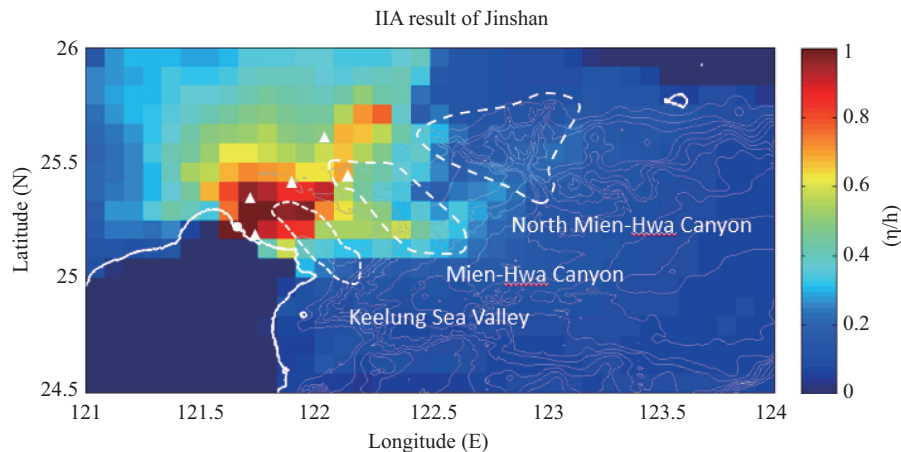
圖二 22 個海嘯情境模擬之最大波高圖。

嘯事件。該事件所記載之海嘯波高於基隆及金山約為 6 至 7 公尺。但海嘯成因卻撲朔迷離。由先前 22 個海嘯源所計算出之結果可發現，基隆、金山一帶即便遭受 $Mw7.8$ 之地震海嘯，其海嘯波高仍僅約 3.5 公尺。然而 1867 年事件之推估海嘯規模約為 $Mw7.0$ ，透過數值模擬，該規模最大可能的海嘯僅約 0.4 公尺，由此可推論，該事件中尚有未知之海嘯生成機制。由於不少文獻提及地震火山噴發，加上基隆與金山外海有不少陡峭地形與火山之分布，以及最新之調查結果亦發現海底崩移 (Storegga Slide) 之遺跡，因此海底山崩或海底火山噴發之肇因必須審慎考慮。這也表示台灣北部特殊地構，若僅討論地震誘發之海嘯，會低估潛在的海嘯風險。

既然知道有另外的海嘯機制存在，接下來的挑戰就是如何找出這些未知的海嘯源。海嘯源的找尋相當重要，例如核電廠要防海嘯，那麼哪個位置的海嘯源對核電廠的影響最大？又如在海

岸發現海嘯沉積物或海嘯石，那麼當時的海嘯是從何而來？這類問題很重要，卻很難回答，主要原因是海嘯可能是近源 (near-field) 也可能是遠域 (far-field)，由於範圍太廣，若直接進行海底探勘，不僅耗時也太過於昂貴，因此在科技部的補助之下，筆者以水動力的角度進行分析，並發展出海嘯影響強度評估法 (Impact Intensity Analysis Method)，簡稱 IIA 法。IIA 的特色在於，透過能量分析，直接由研究位置向外找尋可能之海嘯源，並輔以相關的地物、地震、地質等相關資訊，縮小可能之海嘯來源，最後針對有限個數之海嘯情境進行分析。

所獨創之 IIA 法，成功解析 1867 年基隆海嘯之海嘯源。首先，經過 IIA 法，直接排除位於沖繩海槽南端之情境，也排除來自日本或智利海嘯之可能。在交叉分析後發現，該事件除地震所引發之海嘯外，海底山崩亦為海嘯之主要成因之一，而海底山崩之位置亦透過 IIA 法予以定位，



The IIA result shows that the tsunami sources of the 1867 Keelung event in Jinshan is most likely form a near-field area or Mien-Hwa Canyon.

圖三 以 IIA 法分析金山之可能海嘯來源以及影響強度。

在盲算之情況下，定位出海底山崩發生位置最有可能位於三貂角之東南外海，介於基隆海谷與棉花峽谷間之基隆陸棚（圖 3）。此結果與海測結果吻合，顯示 IIA 法分析之精確性。

透過 IIA 的分析，不僅可迅速掌握核電廠所面臨之潛在海嘯來源，亦可有效找尋歷史海嘯（Historic tsunamis）或古海嘯（Paleo-tsunami）。歷史海嘯泛指有人類記載之海嘯事件。以台灣約 400 年之文化歷史，比對全球大規模海嘯事件之週期約在 500~1000 年之事實，台灣大致有機會記錄不到 1 次之大型海嘯事件。然而，台灣所記錄之海嘯事件次數遠高於此，這也表示台灣遭受海嘯威脅的機率不低，不能因近 100 年來台灣沒有遭逢重大海嘯事件而掉以輕心！

台灣西南沿海，特別是從台南到高雄，再延伸到屏東一帶，歷史上曾有數次海嘯事件的記載，例如 1661 台南海嘯、1781 之屏東東港海嘯、及 1782 之台南大海嘯等。由於台灣獨特的歷史背景，先民早年來台開墾，大多是不識字的「羅漢腳」，即便有海嘯事件，若死傷沒有嚴重到驚動朝廷，根本沒機會被記載，更遑論明末清初的禁海令，將山東至廣東沿海居民內遷 30 至 50 哩，即便有海嘯事件，也很難影響民眾，或列入史籍中。然而，台灣獨特的陰廟與廟宇文化，卻有可能補足這缺口。在海嘯事件後，若有大量死亡，依台灣習俗，會將屍骨收集，並蓋陰廟，或海邊廟宇因為海嘯侵襲而搬遷或重建。一旦有廟宇，就有機會找到事件的蛛絲馬跡。

透過科技部的補助，筆者訪查分析約 800 多間寺廟，並發現不少寺廟有海嘯相關之記載，部分可直接認定為海嘯，部分為風暴潮。以筆者研究團隊所找到的 1894 東港海嘯為例，本案例相當特殊，並未記載於官方文獻上，而是記載於四座廟宇的碑文上。本案例發生於西元 1894 年，於屏東東港大鵬灣北部。目前在該地四座宮廟（東隆宮、鎮海宮、嘉蓮宮、南隆宮）之廟誌、碑文、甚至於廟宇天花板上皆有一致的海嘯記載，事件可信度相當高（圖 4）。

另一個案例則是 1624 風暴潮事件。該事件位於嘉義之布袋好美里鯤港太聖宮（圖 5），此事件也最讓筆者印象深刻。西元 1624 年，荷蘭人曾在鯤港口岸築青峰關砲台，而期間太聖宮遭逢颱風海嘯（過去風暴潮亦稱海嘯）沖毀，而荷蘭士兵迎媽祖神像入青峰關砲台祭祀。這段歷史是否真實已難以考證，然而颱風洪水之記錄仍可作為科學研究之參考。這次訪查中，太聖宮蔡隆德先生熱情向筆者介紹這段歷史，並將四百多年之媽祖神像取下交付筆者仔細研究，讓筆者相當感動，也給筆者重要動力，繼續為台灣歷史宮廟海嘯盡一份心力（圖 6）。

透過 IIA 分析，並搭配 COMCOT，以多重巢狀網格求解含溢淹之非線性球座標淺水波方程式，成功還原許多歷史海嘯事件。而當海嘯逼近岸邊，甚至衝擊上岸，進而對核電廠或結構物造成損害時，海嘯的研究將進入災防與工程的範疇。所求解的方程式也從淺水波方程式，轉變為



圖四 鎮海宮外觀（左），以及鎮海宮天花板之海嘯記載（右）



圖五 嘉義布袋好美里颯港太聖宮外貌（左），太聖宮蔡隆德先生（右，著藍色衣服者），背景為有 400 多年之媽祖神像相片。



圖六 400 多年之媽祖神像本尊（左）。蔡隆德先生展示過去媽祖肉身做藥引所挖出之碗狀凹痕（中）。碑文上所寄載青峰闕之事蹟。

三維含碎波自由液面之 Navier-Stokes 方程式。能夠同步求解大尺度之海嘯與小尺度之結構物衝擊的研究團隊在國際間相當少。若還要考慮海底山崩的邊坡滑動以及結構物周圍的局部沖刷，那麼大約只有台灣能夠直接求解[1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 13-15, 17, 19]。這也使美國知名的海嘯學者如 Prof. Costas Synolakis 與 NOAA 的 Dr. Eddie Bernard 海嘯前輩對台灣的海嘯研究成果感到驚奇。Dr. Eddie Bernard 甚至還指名單獨與筆者研究團隊討論。

除此之外，還有兩個有趣的台灣海嘯分析，其一是 1661 鹿耳門水漲事件，該事件與台灣起源有關，最曲折有趣，精彩萬分。其二是屏東九鵬與蘭嶼的海嘯石，海嘯石的發現代表過去曾有大規模之海嘯事件，分析上需要特殊的三維移動固體法與三維沖刷坑的計算，該案例讓筆者在數值招式上發揮得很過癮。但限於篇幅，期待下回繼續。

參考文獻

- [1] C. Lin, M.-J. Kao, G.-W. Tzeng, W.-Y. Wong, J. Yang, R. V. Raikar, T.-R. Wu and P. L.-F. Liu, Study on Flow Fields of Boundary-Layer Separation and Hydraulic Jump during Rundown Motion of Shoaling Solitary Wave, *Journal of Earthquake and Tsunami*, **9**, 5 (2015a).
- [2] B.-R. Wu, S.-S. Ke, T.-R. Wu and K.-S. Liu, Tsunami Inundation Map and Its Application on Evacuation Planning in Taiwan, *Journal of Earthquake and Tsunami*, **9**, 5 (2015).
- [3] S. C. Lin, T.-R. Wu, E. Yen, H.-Y. Chen, J. Hsu, Y.-L. Tsai, C.-J. Lee and P. L.-F. Liu, Development of a tsunami early warning system for the South China Sea, *Ocean Engineering*, **100**, 1-18 (2015b).
- [4] G.A. Zarruk, E.A. Cowen, T.-R. Wu and P.L.-F. Liu, Vortex shedding and evolution induced by a solitary wave propagating over a submerged cylindrical structure, *Journal of Fluids and Structures*, **52**, 181-198 (2015).
- [5] C. Lin, P.-H. Yeh, M.-J. Kao, M.-H. Yu, S.-C. Hsieh, S.-C. Chang, T.-R. Wu, and C.-P. Tsai, Velocity Fields in Near-Bottom and Boundary layer Flows in Prebreaking Zone of a Solitary Wave Propagating over a 1:10 Slope, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, **141**, 3 (2015c).
- [6] T.-R. Wu, C.-R. Chu, C.-J. Huang, C.-Y. Wang, S.-Y. Chien and M.-Z. Chen, A two-way coupled simulation of moving solids in free-surface flows, *Computers & Fluids*, **100**, 347-355 (2014a)
- [7] T.-R. Wu, H. Wang, Y.-Y. Ko, J.-S. Chiou, S.-C. Hsieh, C.-H. Chen, C. Lin and C.-Y. Wang, M.-H. Chuang, Forensic Diagnosis on Flood-Induced Bridge Failure, Part II- framework of Quantitative Assessment, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **28**, 1, 85-95 (2014b).
- [8] Z. Huang, T.-R. Wu, T.-Y. Chen and S. Y. Sim, A possible mechanism of destruction of coastal trees by tsunamis: A hydrodynamic study on effects of coastal steep hills, *Journal of Hydro-environment Research*, **7**, 2, 113-123 (2013a).
- [9] Z. Huang, T.-R. Wu and Syamsidik, Recent Research on Tsunami Hazards for Sumatra and the South China Sea Area, *Journal of Earthquake and Tsunami*, **7**, 1 (2013b).
- [10] K.-C. Hu, S.-C. Hsiao, H.-H. Hwung and T.-R. Wu, Three-dimensional numerical modeling of the interaction of dam-break waves and porous media, *Advances in Water Resources*, **47**, 14-30 (2012).
- [11] T.-R. Wu, Deterministic Study on the Potential Large Tsunami Hazard in Taiwan, *Journal of Earthquake and Tsunami*, **6**, 3 (2012).
- [12] T.-R. Wu and D.-C. Ho, High resolution tsunami inversion for 2010 Chile earthquake, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**, 3251-3261 (2011).
- [13] T.-R. Wu, C.-J. Huang, M.-H. Chuang, C.-Y. Wang and C.-R. Chu, Dynamic Coupling of Multi-phase Fluids with a Moving Obstacle, *Journal of Marine Science and Technology*, **19**, 643-650 (2011a).

- [14] T.-R. Wu, M.-H. Chuang, C.-J. Huang, M.-Z. Chen, C.-Y. Wang and C.-R. Chu, Developing a Two-way Coupled of Moving Solid Method for Solving Landslide Generated Tsunamis, Tsunami Simulation for Impact Assessment, Penerbit Universiti Sains Malaysia, 63-73 (2011b).
- [15] Z. Huang, T.-R. Wu, C. Liu and M.-H. Chuang, Experimental and Numerical Study of Solitary Waves Passing Over a Vertical Thin Wall, Tsunami Simulation for Impact Assessment, Penerbit Universiti Sains Malaysia, 95-105 (2011).
- [16] T.-R. Wu and D. He, Development of Small Unit Tsunami Inverse Method: Application to the 2006 Ping-Tung Earthquake, Tsunami Simulation for Impact Assessment, Penerbit Universiti Sains Malaysia, 152-162 (2011c).
- [17] T.-R. Wu and M.-S. Wei, Numerical Analysis on the 3D Bores Interaction with Structures, Tsunami Simulation for Impact Assessment, Penerbit Universiti Sains Malaysia, 239-249 (2011d).
- [18] 吳祚任, 2011 日本福島海嘯之研究與省思 若發生馬尼拉海溝地震・預測海嘯將於 13 分鐘達我核三廠, 土木水利: 中國土木水利工程學會會刊, **38**, 2, 1-7 (2011).
- [19] M.-H. Chuang and T.-R. Wu, Dynamic Coupling of Multiphase Fluids with a Moving Obstacle: Developing a Two-way Coupled Moving Solid Method for Solving Landslide Generated Tsunamis, VDM Verlag Dr. Müller (2010).
- [20] T.-R. Wu and H.-C. Huang, Modeling tsunami hazards from Manila trench to Taiwan, Journal of Asian Earth Sciences, **36**, 1, 21-28 (2009).
- [21] K. Megawati, F. Shaw, K. Sieh, Z. Huang, T.-R. Wu, Y. Lin, S. K. Tan and T.-C. Pan, Tsunami hazard from the subduction megathrust of the South China Sea: Part I. Source characterization and the resulting tsunami, Journal of Asian Earth Sciences, **36**, 1, 13-20 (2009).
- [22] Z. H., T.-R. Wu, S. K. Tan, K. Megawati, F. Shaw, X. Liu and T.-C. Pan, Tsunami hazard from the subduction Megathrust of the South China Sea: Part II. Hydrodynamic modeling and possible impact on Singapore, Journal of Asian Earth Sciences, **36**, 1, 93-97 (2009).