

# 利用現行國內核子事故劑量評估系統評估福島事故之模擬研究

蔡宗樺 曾慧婷 鄧仁星

中央氣象局氣象科技研究中心

## 摘要

福島核災事件是近年來最嚴重的環境災害，而同樣擁有核能發電設施的台灣也開始重新省視，現行國內緊急應變評估系統能否有足夠的能力與對策來因應類似這樣的嚴重事故。因此本研究挑選日本 311 福島事件為例，利用國內這套緊急應變劑量評估系統中之數值擴散模組，針對福島事件前五個高劑量排放事件進行模擬研究，另外本研究額外加入乾沉降和濕沉降之物理移除過程，期待能大幅增加模式在乾溼沉降量估計之準確性。最後將其模擬結果配合日本相關研究結果及實際觀測加以驗證比對，進而討論 Cs-137 輻射物質對日本各地影響情況，也期望能作為目前國內核能發電廠緊急劑量評估系統之驗證與精進的基礎。

由模擬結果顯示，本系統能成功模擬出福島事件期間，三個高濃度輻射排放事件，隨著風場分別往福島第一核電廠東北方和西南方進行擴散的相對位置，Cs-137 輻射物質在擴散的路徑上造成大量的乾濕沉降過程，顯示本劑量評估系統在部分定性與局部定量上都具有不錯之可信度。

關鍵字：福島事件、銫 137

## 一、研究背景與福島事件回顧

2011 年 3 月 11 日，日本東北方發生芮氏 9.0 強震襲擊日本地區，毀滅性大地震引起海嘯，席捲幾十個沿海的鄉鎮，造成約 15000 人死亡和至少 2700 人目前仍下落不明。而位於太平洋海岸的福島第一核電場內共有 6 部反應爐機組，當 311 地震發生時，1、2、3 號機為正常運轉狀態，4、5、6 號機則於停機維修中，前 3 部反應爐機組雖受到強烈地震訊號後立即停機，但隨後的 14 公尺大海嘯，造成福島第一核電廠緊急供電設備嚴重受損，在完全喪失電源供電情況下，運轉中的三部機組均無法順利進入冷停機狀態反應爐開始過熱。地震與海嘯造成的損毀也阻礙了外來的救援。在之後的幾個小時到幾天內，發生一連串嚴重的複合式災難。

福島核災事件是近年來最嚴重的環境災

害，而同樣擁有核能發電設施的台灣也開始重新省視，現行國內緊急應變評估系統能否有足夠的能力與對策來因應類似這樣的嚴重事故。因此本研究亦將利用現行國內緊急應變劑量評估系統中之 A2C 模式（Atmosphere to Computational Fluid Dynamics- transport and diffusion）數值模組為主軸，並參考福島事件中 Katata et al., (2012) 排放劑量為依據，以福島核能一廠為中心(37.42°N, 141.03°E)進行事故發生後，前 5 天內的高污染事件模擬研究，本模式在大氣擴散部分額外加入乾沉降與濕沉降過程，最後將模擬結果配合他人研究結果及實際觀測加以驗證比對，進而討論輻射塵對日本各地污染情況，也期望能作為目前國內核能發電廠緊急劑量評估系統之驗證與精進的基礎。

## 二、研究工具與方法

A2C 數值模式將氣象(A2Cflow)和污染物(A2Ct&d)擴散分成兩模組。

### (一)A2C flow 氣象部分模式設定

本次模擬福島事件中，模擬時間設定為 2011/03/12 0300 JST 至 2011/03/17 0900 JST 共五天(126 小時)。首先利用 NCEP-FNL(National Centers for Environmental Prediction Final)Operational Global Analysis data)全球最終分析場資料(空間解析度為  $0.5^\circ$ )和 CWB 地面天氣圖，主觀判斷出每 6 小時一筆的環境風場資料，溫度方面則參考日本福島地區觀測資料(CRIEPI,2012)及 NCEP-FNL 溫度場，取當天日均溫當作模式初始場設定溫度。而日本東部海域受到黑潮等洋流之影響，因此也參考 NoAA RTG\_SST (Real-Time, Global, Sea Surface Temperature analyses)海表面溫度資料，在這五天的模擬期間給定  $10^\circ\text{C}$  海平面溫度值。綜合以上初始資料輸入 A2C flow 模式中進行 36 小時的模擬，由於模式前 12 小時仍屬於調節過程 (spin up)，故利用後 24 小時的資料當作該天氣類型環境下之細部氣象資訊，而後仿造目前國內核電廠劑量評估系統中之風場混合方式，得到這五天期間包含大尺度環境變化的日本區域每小時之三維精緻氣象資訊。研究中所選擇的 A2C 模擬範圍如(圖 1)，共四層巢狀網格，水平網格解析度依序為(D1)8 km、(D2)4 km、(D3)2 km、(D4)1 km，水平網格分別為(D1)101 × 101、(D2)61 × 61、(D3) 61 × 61、(D4)61 × 61，domain2 以及 3 和 4 皆以福島核電廠為中心，是本研究主要討論的區域，垂直方面模式頂為 5 公里，垂直分成共 15 層。

為了使模式中的地表過程和地形高度與日本地區真實地貌較為接近，進而改善在氣象模擬結果，在本研究中另外加入 USGS (U.S. Geological Survey) 原始地面資料-地表型態與地形資料。(圖 2)為將 USGS30sec 資料引入至模擬 domain 1 中日本地區(解析度為 8km)之地形高度資料與土地利用型態分布。

### (二)A2C t&d 輻射物質部分模式設定

Cs-137 半衰期約為 30 年(10960 天)，較 Ru-103、I-131、Te-132、Cs-134 等其他何種半衰期時間較長，因此經過大氣擴散後仍維持其輻射強度。Klug et al.,(1997)認為 Cs-137 為類似車諾比重大核子事故之大氣長程傳輸之最好指標核種。故本研究以福島第一核電廠為中心(500、4135.714 UTM 座標)進行之核事故情境模擬，以 Cs-137 為模擬核種，並參考先前學者 Katata et al.,(2012)所得之 Cs-137 放射源模組，Cs-137 乾沉降速度參數設定為  $0.001\text{m/s}$ ，進行 7440 分鐘輻射物質連續性釋放，模擬時段(2011/03/12 05JST 至 2011/03/17 09JST)其中包含三次主要高污染排放事件(圖 3)。

輻射塵除隨著大氣的運動在空氣中傳送及擴散，也會經由所謂的乾沉降、濕移除和放射性衰變等過程導致在大氣中擴散之放射性核種質量的減少，其中放射性核種會透過乾沉降、濕沉降於地表累積，亦可能在濕沉降的過程當中形成雲滴或雨滴的凝結核。因此在 A2Ct&d 當中參考 Hysplit (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 模式當中對於以上物理機制的計算方法引入，使 A2Ct&d 亦可進行沉降過程的計算。

因此本研究特別設計在 3 月 15 日 1200 JST~3 月 16 日 0000 JST 連續 12 小時，(參考實際降雨量)假設日本地區降雨資料  $5\text{mm/hr}$ (圖 4)輸入模式中，探討 A2C t&d 的濕沉降表現過程，隨後的章節本文將分別對這三個高沉降量事件，進行詳細的分析與討論。

## 三、個案分析與結果討論

### (一) 事件一 3月12日至13日 個案分析與結果討論

綜觀氣象部分先從 3 月 12 日 1200UTC(圖 5 A) CWB 地面天氣圖進行分析，大陸冷高壓中心強度為  $1025\text{hPa}$ ，中心位置位於日本東南方海面上 ( $144^\circ\text{E}$ 、 $37^\circ\text{N}$ )，福島地區受大陸高壓外圍環流影響，風場主要以南風為主。24

小時過後 3 月 13 日 1200UTC，大陸高壓系統逐漸東移至太平洋面上，福島地區受到高壓迴流尾端影響，風場轉為西風西南風。此時在日本西南方琉球群島附近生成低壓系統(131° E、30° N)，中心強度約為 1014 hPa，未來幾天低壓系統持續往日本東北方發展移動，大尺度風場將接由此低壓系統為主導。

福島核電廠事件部分，福島核電廠原本運轉中 1、2、3 號機因發生 9.0 大地震關係而自動停機，緊急備用柴油發電機雖曾及時啟動供電，但因隨後發生之海嘯造成緊急備用柴油發電機失效，反應冷卻系統因此停止運作，爐心核燃料因水量不足而使溫度升高，並引發劇烈銼水反應而產生氫氣，3 月 12 日 15:30 JST 左右(圖 3)，1 號機核電廠發生氫氣洩漏至反應爐廠房，使外部建築屋頂因氫爆而損毀，間接導致輻射物質大規模外洩。

圖 6A 為 Terada et al.,(2012)利用 WSPEEDI-II 模式 3km 網格解析度模擬(事件一)2011/03/12 0900 JST 至 3/13 0900 JST Cs-137 日累積地表沉降量模擬結果，圖 6 B 同圖 6 A 皆是利用 WSPEEDI-II 模式但為 Katata et al.,(2012)1km 網格解析度模擬結果。圖 6 C 與 6 D 則為 A2C t&d Cs-137 日累積地表沉降量模擬結果，網格解析度分別為 4km 與 1km。從 3/12 Cs-137 整日地表沉降量主要分布來看(圖 6)，受到大尺度西南風影響，由福島中心排放源向東北方海域擴散，A2C 模擬結果與 WSPEEDI-II 模式擴散分布大致相似。在極值的部份，雖然整日的風場都主要以南風或西南風為主，但在 12 日當地時間下午 15:30 JST 核電廠 1 號機發生氫爆，大量放射性物質排出，剛好此時綜觀環境風場不強，因此大量輻射物質隨著下午的海風環流吹往內陸，造成沉降量極值約  $5 \times 10^5 Bqm^{-2}$  在福島西北方，並不是在東北方外海。而 A2C t&d 和 WSPEEDI-II 兩模式相比，兩者皆有掌握到此分布現象。

## (二) 事件二 3月13日至14日 個案分析與結果討論

由 3 月 14 日 1200 UTC 中央氣象局地面天氣圖(圖 5B)顯示，低壓中心氣壓降低至 1011 hPa 且逐漸接近日本本島，福島地區風場吹西南風。

根據 JAEA(Japan Atomic Energy Agency) (2011)報導福島核電廠 3 號機於 3 月 13 日亦有惡化情形，緊急冷卻系統故障已失去功能，為了冷卻反應爐，避免爐心熔毀，已採取將海水注入反應爐之措施。另外如同 1 號機案例，3 號機的建築內部也正在累積氫氣，3 月 14 日 11:01 JST 3 號機也因同樣問題而導致無可避免的氫氣爆炸，造成 11 人受傷，建築物屋頂及外牆的上半部分遭炸毀，附近監測器也觀測出較高的輻射劑量率(圖 3)。

事件二期間 A2C 模式呈現出兩個不同風向的大尺度風場，由(圖 7)顯示，這天日累積沉降量分布同樣受到風場影響，呈現兩個不同區域，白天受到西南風影響，輻射物質往東北方海域擴散並沉積，值大約有  $10^2 Bqm^{-2}$ (圖 7 C)。而 Cs-137 當日沉積量高值最主要分布在福島核電廠西南方，其原因為當日接近中午時約 11:00 左右 3 號機廠房氫氣爆炸，有高污染劑量排放出(值約  $83 \times 10^9 Bqs^{-1}$ )，因此大量 Cs-137 污染物順著晚上的東北風往日本西南方關東地區沉降，如東京縣、埼玉縣，神奈川縣皆受到  $5 \times 10^5 Bqm^{-2}$  以上高劑量 Cs-137 乾沉降污染。

由事件二中 A2C t&d 日地表沉降量分布位置與沉降量極值跟 WSPEEDI-II 模擬結果相比，A2C t&d 最內層網格 1km 解析度(圖 7D)結果較偏向內陸(西南方)，由於 A2C flow 是結合大氣環流與計算流體力學中小尺度模式，在海陸交界處大氣流場較敏感，易受到由海陸與地形差異加熱不均的局部向/離岸風環流日夜變化影響，因此造成在細網格結果中，下午海風加成大尺度東北風，沉降範圍順著風場較偏內陸區域。

## (三) 事件三 3月15日至16日 個案分析與結果討論

事件三大尺度風場從 3 月 15 日 1200 UTC 地面天氣圖(圖 5 C)可知，低壓系統持續往東北方移動，低壓中心位於(147.5° E、37.5° N) 圖中顯示日本東北部地區等壓線跟前 24 小時相比明顯便密許多，低壓中心也降低為 1002 hPa，福島地區受到低壓系統環流影響更加明顯，大尺度風場更較凌亂，日本地區風場從東北風順轉成東南風(圖 5 D)。而由日累積雨量資料 Katata at el.(圖略)顯示，由於低壓氣流通過日本本地，造成日本當地皆有明顯的降雨，當日累積雨量最大值約可達 10cm/day。

東電(TEPCO 2011c)表示，3 月 14 日 13:25 JST 2 號機的冷卻功能已完全停止而開始注入海水，18:06 JST 開始洩壓作業；3 月 15 日上午 06:14 JST 2 號機抑壓池傳出爆炸，這次爆炸造成圍阻體底部的壓力抑制槽損壞，在爆炸之前輻射等效劑量率大約為 73 微西弗每小時，在爆炸兩個小時之後，等效劑量率很快就升高至 8217 微西弗每小時。爆炸發生 3 小時之後，繼續提高至 11900 微西弗每小時，當日約在中午 10 點時，由於壓力槽發生破裂，2 號機組確定出現中子輻射，而在本次模擬事件中，2 號機組所排放出的輻射劑量最多且時序最長(圖 3)。

由(圖 8)和 JAEA (2011)報告中得知，3 月 15 日早上 Cs-137 順著大尺度風場往福島西南方傳送，造成福島西南地區和茨城縣北部地區，產生大量乾沉降過程，A2C t&d 在乾沉降部分(西南方)依舊掌握得相當不錯，沉降量值也可高達到 $10^5 Bqm^{-2}$ 以上。到了下午則因為低壓系統接近影響，大尺度風向順轉成東南風且發生降雨，降水將大氣中之 Cs-137 以濕沉降方式沉降至地面或洋面上，輻射物質由乾沉降轉變成濕沉降過程，形成日本縣內各地如新潟縣、枋木縣、福島縣、群馬縣地面沉積量大幅增加，污染物也順轉至日本西北方向沉降，本文在 3/15 後半天加入假設的降雨資料(圖 4)，使得 A2C t&d 模式也能成功模擬出因降雨，所導致福島西北方區域較高沉降量約  $5 \times 10^5 Bqm^{-2}$

濕沉降過程。

由 WSPEEDI-II 和 A2C t&d 兩圖 Cs-137 沉降量互相比較。發現 A2C t&d 在 3/15 這天雖然污染物往福島西北方傳送，但其擴散的位置與 WSPEEDI 結果相比有較偏西北方的趨勢，推論為風場誤差所導致，在 3/15 這天日本地區受到低壓系統影響，風場較零亂，而目前的 A2C flow 只能每間隔六小時給一筆單點探空資料進行模擬後在內插，當大尺度環境變化迅速時，常會導致模擬結果與真實情況相比，出現風場延遲或局部區域風場誤差，就會導致沉降量分布位置，或日累積沉降量極值位置出現誤差，這部分為系將作為系統未來改進之重點之一。

## 四、結論

本研究挑選日本 311 福島事件為個案，利用國內現行劑量評估系統為主軸，針對前五天三個高排放事件進行模擬。整合前面章節之結果，利用 A2C 模擬結果對三個高排放事件做出以下整理，事件一 3/12 日下午 1 號機組發生氫爆，高劑量輻射物質釋放到大氣中，受到太平洋海上高壓迴流天氣系統影響，污染物主要往日本西北方和太平洋海上擴散，屬於乾沉降過程。事件二 3/14 日中午 3 號機組也同樣發生氫爆，而晚上低壓系統逐漸接近，風場順轉成東北風，污染物隨著東北風往日本西南方傳送，也屬於乾沉降過程。事件三中 3/15 日則因爆炸造成 2 號機組壓力抑制槽損壞，本日所釋出劑量排放量為五天最大值，上午污染物往西南方擴散，屬於乾沉降部分，而到了下午後，受到低壓系統增強且通過東日本，造成日本地區出現明顯降雨，污染物由隨著降水轉為濕性沉降，造成大範圍濕沉降過程，污染物沉降量值增大且面積較廣。

## 五、參考文獻

Chino, M., H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata & H. Yamazawa, 2011:

Preliminary estimation of release amounts of  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into atmosphere.

Katata, G., M. Ota, H. Terada, M. Chino, H. Nagai, 2012: Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear power plant accident. Part I : Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident. *J. Environ. Radioact.*, **109**, 103-113.

Terada, H., G. Katata, M. Chino, H. Nagai, 2012 :Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II : verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J. Environ. Radioact.*, **112**, 141-154.

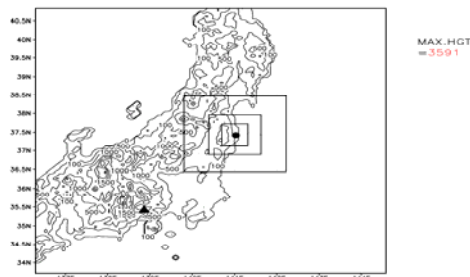


圖 1:模式四層巢狀網絡設計，圖中黑色圓點代表福島第一核電廠，黑色三角形則為日本地形最高處富士山 (MAX.HGT=3591 m)，黑色實線為地形高度等值線。

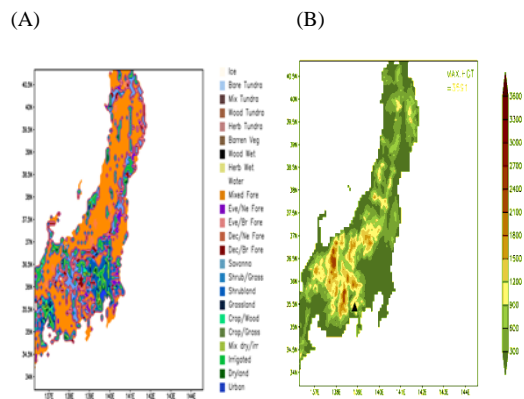


圖 2: (A)USGS 30sec 引入至 A2C 模式(解析度為 8km)土

地利用型態分布圖。(B)USGS 30sec 引入至 A2C 模式(解析度為 8km)地形高度分布圖，色階代表地形高度，黑色三角形則為日本地形最高處富士山(MAX.HGT=3591 m)。

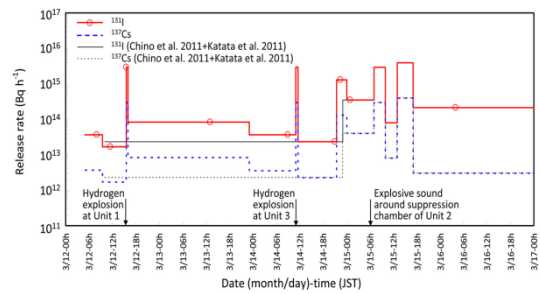


圖 3: 2011 年 3 月 12 日至 17 日監測碘(I-131)和銫(Cs-137)釋放率時序圖。黑色實線和黑色點虛線則分別代表 Chino et al. (2011)和 Katata et al. (2011)研究結果。圖中另外標記 Prime Minister of Japan and His Cabinet, 2011 所述出核電廠所發生重要事件和日期。(資料來自 Katata et al. 2012)

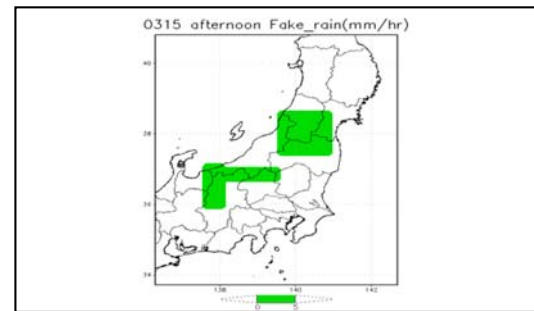
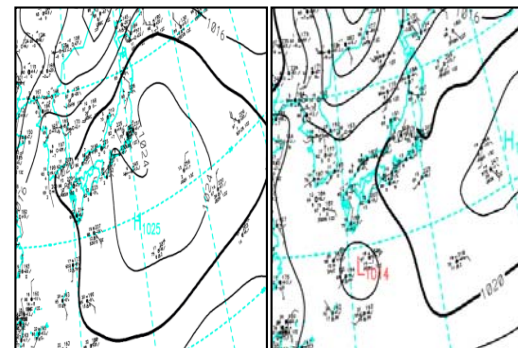


圖 4: (參考實際降雨量(圖 3-6))假設日本地區降雨資料，當作輸入 A2C t&d 濕沉降過程的重要參數。色階代表降雨量(mm/hr)。降雨時間為 2013 03/15 1200 JST 至 03/16 0000 JST 共 12 小時。

(A) 3/12 1200 UTC (B)3/13 1200 UTC



(C) 3/14 1200 UTC (D)3/15 1200 UTC

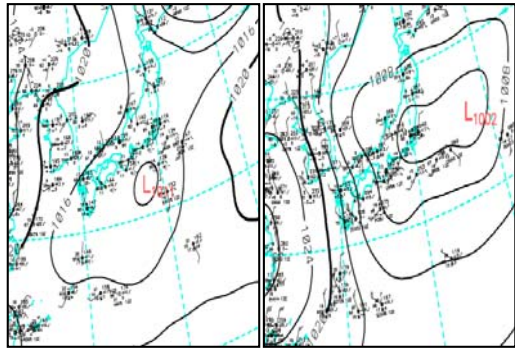
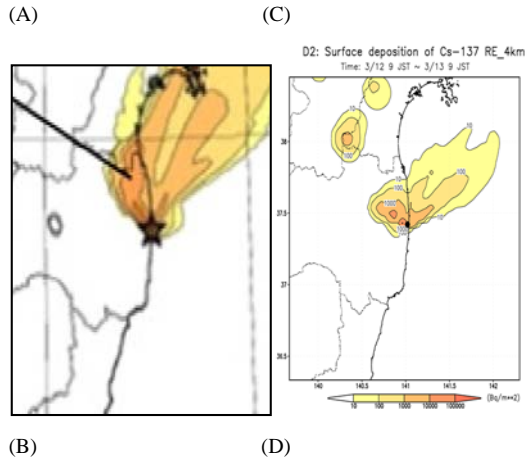


圖 5:中央氣象局(CWB)地面天氣圖。



(A) (B)

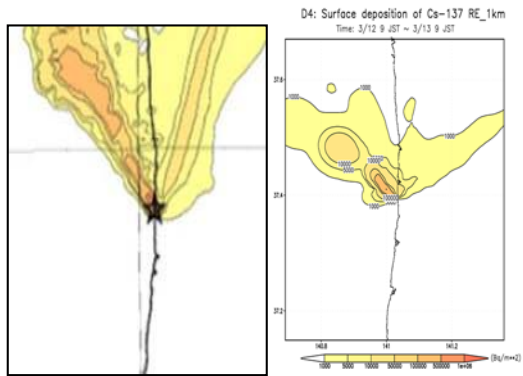
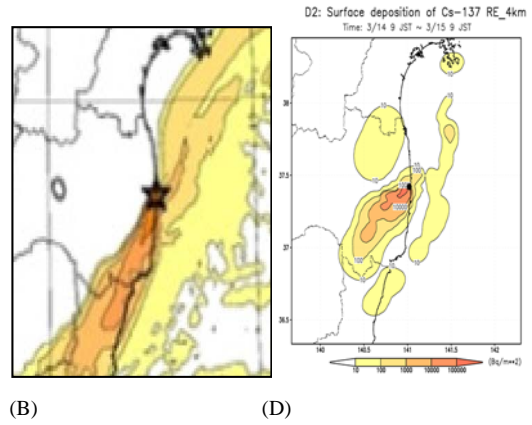


圖 6: (圖 A) 2011/03/14 0900 JST 至 3/15 0900 JST 事件一  
期間，Cs-137 表面沉積累積量之空間分布圖，網格解析  
度 3km(資料來自 Terada et al. 2012)。(圖 B)同(圖 A)但  
網格解析度 1km，資料為(Katata et al. 2012)模擬結果。(圖  
C)A2C t&d domain 2 模擬之 Cs-137 濃度累積之分布圖。  
(圖 D)同(圖 C)但為 domain 4 之模擬結果。

(A) (C)



(B) (D)

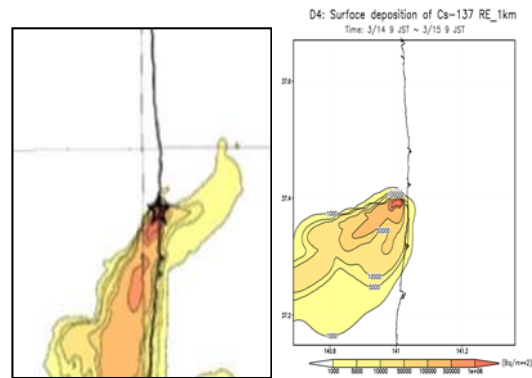
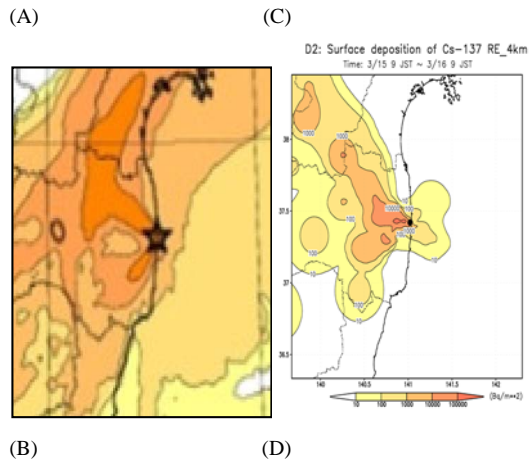


圖 7:同圖 6,但為事件二 2011/03/14 0900 JST 至 3/15 0900  
JST 之結果。



(B) (D)

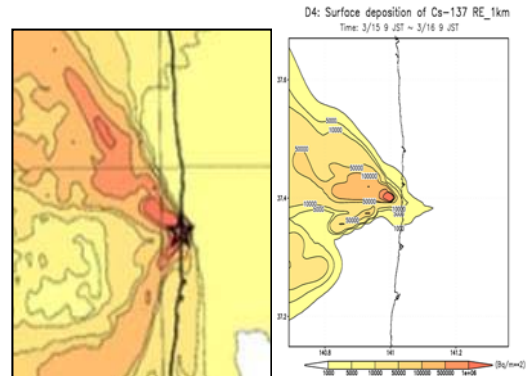


圖 8:同圖 6,但為事件三 2011/03/15 0900 JST 至 3/16 0900  
JST 之結果。

