

台灣新一代劑量評估系統對福島事件之驗證研究

曾慧婷¹ 鄧仁星¹
氣象科技研究中心¹
中央氣象局

摘要

福島事件為近十年來最為嚴重的核災事故，且有別於車諾比與三哩島事件，福島核災是一個隨著地震海嘯發生造成核電廠冷卻系統出現問題進而造成的事故。在地理位置上台灣與日本相似，皆是位在地震帶上的島國，且不論是台灣還是鄰近國家，皆仰賴核能發電，福島事件相當值得我們省思，因此，在以原劑量評估系統為基礎下，開發了台灣新一代的劑量評估系統，利用現有的全球模式、區域模式預報資料，來計算核電廠的放射性污染物的影響，釋放源可設置在全球的各個地區，應用性更廣。本篇研究則是我們台灣新一代劑量評估系統在福島事件期間對於放射性污染物銫 137 的影響過程進行研究，也藉以驗證這套新發展的模式。

其中，在 2011 年 3 月 15 日有一段約 4 小時的大量釋放期間，且配合上鋒面的降雨，此日的濕沉降量為整個福島事件帶來了很大的貢獻，因此特別針對這天進行降雨設計以及風向分布的調整，在我們模式的濕移除機制下，放射性物質受到風場輻合、地形以及降雨的影響之下，在福島電廠西北方的山谷地區，大量的沉降，與實際的情形有相當的匹配。其他時間在乾沉降的表現上，因為受到 NCEP GFS 模式時間解析度為 6 小時的影響，快速變換的風場掌握較不佳，但大致上銫 137 的沉降分布趨勢都有不錯的表現。

關鍵字:福島事件、台灣新一代劑量評估系統

一、前言

2011 年的福島事件起因於 3 月 11 日發生於日本本州東北海岸的地震，地震規模達芮氏 9.0，並引起大規模的海嘯，以致福島核電廠發電機組的冷卻系統癱瘓，核電廠的機組在不斷升溫之下爐心熔毀，大量放射性物質在日本時間 3 月 12 日 06 時開始外釋(Chino et al. 2012)，且在伴隨著氫爆的發生，短時間內釋放出大量的放射性物質，福島事件期間期銫 137 總外釋量可達 13 PBq。而這樣等級的核子事故，也引起了世界各國的恐慌，紛紛密切的進行放射性物質的監測，顯示核子事故的影響是世界性的。

台灣原有之劑量評估系統，主要是利用 Yamda et

al.之 A2C 模式，評估系統主要應用 A2C 模式的 HOTMAC 和 RAPTAD 兩個部分，HOTMAC 三維中尺度預報模式負責產出三維的氣象資料，RAPTAD 為一煙陣擴散模式，用於放射性物質外釋擴散分布，其設計的目的在於國內核電廠的安全防護，因此其氣象資料使用的範圍侷限在核電廠附近，但在經過福島事件之後，便深刻的體會到核能安全的不僅僅是境內，也應考慮到境外的核電廠。這幾年在氣象資料的進行模式的降尺度系統發展，可直接提高多種模式資料之網格解析度，節省高解析度氣象模式額外輸出資料之時間，取代了 A2C 模式中的 HOTMAC。在煙陣擴散模式的部分則是加入了乾、濕沉降以及劑量的計算，並修改了座標使用的格式，使得 RAPTAD 變成一套無

邊界的模式，也就是煙陣是持續存在在世界各地，對於長時間的模擬也能呈現出整個大氣環流對放射性物質的影響。

JAEA 主要使用的系統 WSPEEDI-II，自事件發生後，進行了相當多方面的研究，利用此系統的結果進行射源項回推以及回推結果的驗證(Terada et al.和 Katata et al. 2012)，不論是氣象觀測資料還是劑量觀測資料，日本當地都可以得到較為完整的資料，因此本篇研究驗證的部分多與 JAEA 團隊的研究進行比對，模式的釋放率時序即參考上述文章之結果，在氣象資料與模式過程不同的情況下相比較，期待可以看見台灣新一代劑量評估系統之優勢，另外，3月15日下午的濕沉降過程對於福島事件全期的貢獻量相當顯著，Katata et al. 2012 年也針對了高劑量範圍成因的研究，藉助這篇文章進行本系統濕沉降機制的驗證。

本篇研究會介紹台灣新一代劑量評估系統之架構，以及使用的氣象資料，接著利用 JAEA 回推的結果進行福島事件的擴散模擬，並依照每一日的沉降特色，與觀測和 JAEA 的結果進行驗證。

二、 研究方法

此套劑量評估系統發展自 80 年代，使用的是 Yamada et. al. 之 A2C 模式(Atmosphere to Computational fluid dynamic Model)，此模式包含了三維地形二階擾動閉合模式(簡稱 A2Cflow)，以及煙流擴散模式(A2C transport and diffusion model, 簡稱 A2Ct&d)。在過去，使用的氣象資料採資料庫的形式，利用單點的風向風速穩定度預報，選取對應氣象類型之三維氣象資料，進行時間內插，產生一組預報 8 天的三維氣象資料，供煙流擴散模式使用。然而，受到福島事件之影響，審慎地重新評估之後，需突破此套系統在氣象資料的限制，以及煙流擴散模式，需考慮放射性物質之乾、濕沉降和半衰期效應等，進行全面的升級。

(一) 氣象資料

不論是粒子擴散模式、煙陣擴散模式，抑或是網格擴散模式皆需要氣象資料進行模擬，而高解析度的氣象資料來源不外乎就是區域模式，例如日本的 WSPEEDI (Worldwide Version of system for Prediction of Environment Emergency Dose Information) 之氣象資

料為 MM5(Mesoscale Model) 的模式結果，美國的 NARAC(National Atmosphere Release Adviser Center) 之擴散模式使用的氣象資料來自

1)ADAPT(Atmosphere Data Assimilation and Parameterization Tool)。我們的氣象資料的使用包含了直接使用全球預報模式:NCEP GFS 及 CWB GFS，其解析度較粗，而較高的解析度之氣象資料，我們可以透過 MDDS(Mesoscale Dynamic Downscale System)，將關注的區域提升至較高的空間解析度。以下即為 MDDS 之簡介。

MDDS(mesoscale dynamic downscaling system) 為中央氣象局與美國國家海洋與大氣總署 (NOAA) 下之GSD (Global system division)合作發展的複雜地形區的三維連續變分降尺度系統。在地形區的氣象場受地形的影響程度視地表的特性及所要解析的尺度而決定。當地形越複雜且解析的尺度越小，氣象場受地形的影響越嚴重。在如此複雜的地形影響下，降尺度方法是否考慮地形的效應就決定了其結果的可信度。本方法利用追隨地勢座標下的純控制方程三維變分法，試圖解出在靜態下因複雜地形產生的氣象場變化，且因為此方法利用較完整的中小尺度氣象物理方程式為變分法的控制方程，其所得結果在不同氣象變數間有相當大程度滿足其所使用的控制方程。考慮僅以動量方程、連續方程、熱力方程及水汽保守方程為控制方程的純三維變分。在追隨地勢座標下計算，其垂直座標定義為

$$\eta = \frac{z_t(z - z_g)}{z_t - z_g}$$

其中 z_g 為地表高度， z_t 為模式頂高度。

另外，為考慮在邊界層中，沉降速度會受到地表的利用、大氣穩定度、物種擴散數的差異，在空間中應有不同的乾移除速率分布，因而在 MDDS 的邊界層中，參考了 AERMOD 模式(American Meteorological Society / Environmental Protection Agency Regulatory Dispersion Model)對粒子乾沉降速率的估算，將乾沉降速度表示為下式:

$$V_{dp} = \frac{1}{R_a + R_p + R_a R_p V_g} + V_g$$

式子中的 R_a 代表的是空氣動力阻力(單位:s/m)， R_p 為準層流阻力(單位:s/m)， V_g 為粒子之重力沉降速度。

空氣動力阻力(R_a)依照穩定度有不同的計算方式，當 L (奧布考夫常數,公尺) ≥ 0 為穩定或中性的天氣，則 R_a 的算法如下：

$$R_a = \frac{1}{ku_*} \left[\ln \left(\frac{z_r}{z_0} \right) + \frac{5z_r}{L} \right]$$

當 $L < 0$ ，為不穩定天氣時，則 R_a 的算法如下：

$$R_a = \frac{1}{ku_*} \left[\frac{(\sqrt{1 - 16 \frac{z_r}{L}} - 1)(\sqrt{1 - 16 \frac{z_0}{L}} + 1)}{(\sqrt{1 - 16 \frac{z_r}{L}} + 1)(\sqrt{1 - 16 \frac{z_0}{L}} - 1)} \right]$$

其中，

k = 馮卡門常數(0.4)

u_* = 摩擦速度(m/s)，由氣象資料計算

L = Monin-Obukhov length scale(m)，由氣象資料計算。

準層流阻力(R_p)之計算：

$$R_p = \frac{1}{(Sc^{-2/3} + 10^{-3/st})(1 + 0.24w_*^2/u_*^2)u_*}$$

其中，

Sc = Schmidt number ($Sc = \nu/DB$) (dimensionless),

ν = 空氣動量黏滯力($\approx 0.1505 \times 10^{-4}$ m²/s),

DB = 空氣中污染物的布朗散射率(cm²/s),

St = 史托克數 [$St = (Vg/g)(u_*^2/\nu)$] (dimensionless),

g = 重力加速度 (9.80616 m/s²)

w_* = 對流速度尺度 (m/s)，來自氣象資料計算。

因此MDDs提供了 R_a 、 R_p 供煙流擴散模式計算乾沉降速度，令粒子的沉降能依照不同的地表利用以及天氣狀態分布而有不同的變化，能更好的估算煙陣移除的效應。

(二)煙陣擴散模式

以 Yamada et. al.發展的 RAPTAD 模式(Random Puff Transport and diffusion model)為基礎，參考了美國海洋大氣總署之 hysplit(The Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) version4 中的乾、濕移除機制，及放射性物質的衰減及劑量的計算，新舊 RAPTAD 差異如圖 2.1，其中為了讓煙流擴散模式能使用多元化的氣象資料，故而將原本的 UTM 座標改成等經緯度座標。

參考 hysplit 模式當中對於以上三種機制的計算方法引入，使 A2Ct&d 亦可進行沉降過程的計算。一般來說，以乾沉降速度(V_d)來計算乾沉降過程的移除率，如下式，

$$\beta_{dry} = V_d \Delta Z_p^{-1}$$

而其中 ΔZ_p 用來描述污染層的高度，乾沉降的質量沉降可被計算。

$$D_{dry} = V_d C$$

C 為煙陣或粒子的質量，當煙陣或粒子進入地表層時，始進行乾沉降的計算。

濕沉降可分為兩種過程(Hicks, 1986)，分別為 rainout和washout，rainout指的是放射性核種轉變為雨滴的凝結核，此過程主要在雲中進行，而washout指的是，放射性核種被雨滴沖刷帶到地表的沉降作用，主要發生在雲底以下。在模式中，於一個有降水的網格點上進行計算，雲底被定義成相對濕度第一次達到80%的那層，和雲頂相對濕度達60%的那層，當沒有相對濕度時，將雲頂設定為3000公尺，雲底設定為500公尺。所有的濕沉降總合會透過在雲頂(F_t)底下的部分粒子和在雲底(F_b)以上的部分粒子進行校正。其中， P 為降雨強度(mm hr-1)。雲中濕移除的時間常數為

$$\beta_{inc} = F_t F_b V_{inc} \Delta Z_p^{-1}$$

其中， $S=3.2 \times 10^5$ 為單位體積的平均清除比， ΔZ_p 為污染層的厚度，不同的污染物將會有不同的清除比。雲下的沉降直接被定義成常數率與降雨率之間為獨立關係，雲下的沉降時間常數(s-1)

$$\beta_{bel} = 5 \times 10^{-5} (1.0 - F_b)$$

空氣的濕沉降取決於其溶解度而較不活躍的氣體可視其Henry's Law constant (Molar atm-1)方程式而定，其為水中和空氣中污染物平衡濃度的比值。

放射性核種的輻射衰減，亦將於每一個時間步階進行計算，其公式為：

$$\beta_{rad} = \ln 2 / T$$

T為各放射性核種的半衰期時間，而汙染物質量的輻射衰減定義為

$$m_2 = m_1 \exp(-\beta_{rad} \Delta t).$$

得到經過衰減的地表濃度值及地表沉降量，對於空氣浸身、呼吸射入、地表輻射等途徑，乘上各種核種的轉換因子計算而得。

(三)模式設定

本篇研究主要利用Katata et. al. 2012年回推之鈷137釋放時序，當作本系統之釋放時序進行模擬，使用的氣象資料及模擬範圍共有兩層，外層為NCEP GFS之全球範圍，水平解析度為0.5度，內層為包含福島電廠之日本本州地區，水平解析度為3公里，東西、南北方向各1374公里的範圍。為了能夠持續追蹤汙染物的蹤跡，新版的RAPTAD將最外層範圍設計為全球，事故或關注區域則是需要較為細節的分布結果，其高解析度氣象場資料通常來自於MDDS將較低解析度的預報資料降尺度成高解析度資料。

整個福島事件中，3月15日的濕沉降在總沉降量有一定比例的貢獻，因此本篇文章除了對總累積的沉降量做一比較外，也有相當的篇幅在於本系統對於這天濕沉降的貢獻量呈現，但由於降尺度系統還未發展至雲雨部分的處理，在此處的雨帶分布是依照當時之天氣圖及鋒面位置假想設計，如下章節所說明。

三、 結果討論

NCEP GFS 模式的分析場氣象資料，0.5 度的解析度，每 6 小時一筆的資料，(圖 3.1)，而 15 日下午鋒面通過日本，為關東地區帶來了不少的降水，此日降水之濕沉降量對福島事件之貢獻量甚多，因此雖未取得當時之降雨資訊，但仍參考 Katata et al.(2012) 文章中降雨的分布簡單進行降雨區域的設計，來探討本模式濕沉降機制的成效，如前一章節所說，本模式的濕沉降機制主要是由降雨率與雲層的高度、厚度來進行判斷，計算移除量，如圖 3.1c~f 為降雨分布，而雲底為舉升凝結面的高度，雲頂則為平衡面的高度估計之，如圖 3.2a。另外，受鋒面通過影響局部風場變

化快速，因此在 NCEP GFS 的風場之下，無法呈現出當地時間中午左右這段持續的東南風，因此將風場進行調整，將 01UTC~09UTC 之風場都由 NCEP GFS 的東南風(06UTC)取代，為使得與 JAEA 的結果比較之變因更少。

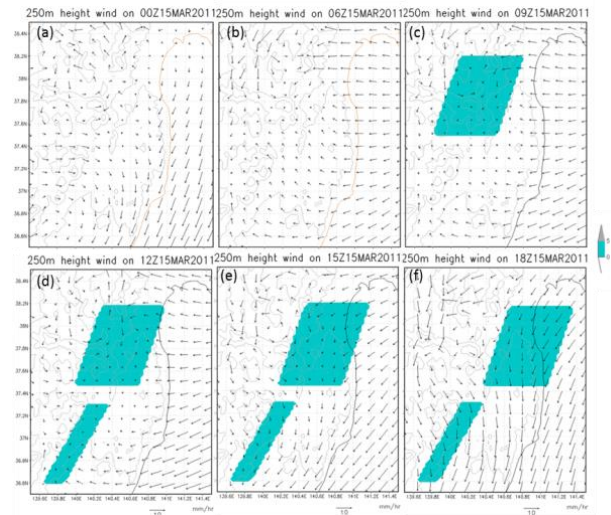


圖 3.1 2011 年 3 月 15 日降尺度系統風場變化及設計雨帶的分布位置。

在乾沉降(圖 3.2b)與濕沉降(圖 3.2d)的比較，自 14 日開始的風場是由東北風轉東南風再轉成西南風之順轉的變化，因此在 15 日時便有大量的煙陣存在於福島電廠的西南方，當風向轉為東南風時，煙陣便會往內陸移動，越過阿武隈高地，在山地左側的山谷，便被奧羽山地阻擋，當煙陣的移動過程都是相同的情形下，有濕沉降資訊時，鋒面的輻合降雨區正好在山谷地區(圖 3.1)，此處的沉降量便會比只有乾沉降時大得多，並且當風向轉為西南風時，經過降雨區之煙陣，其濃度已減少很多，因此在濕沉降(圖 3.2d)與乾沉降(圖 3.2b)在福島電廠北方就少了一區明顯的沉降貢獻。在未調整風場(圖 3.2c)，煙陣無法到達山谷地區，山谷地區之沉降量便減少許多。

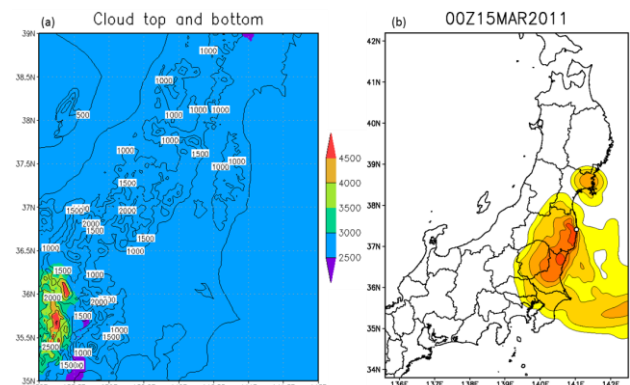
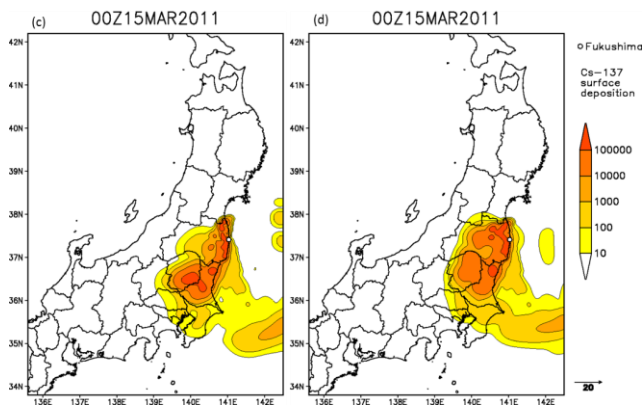


圖 3.2 雲底、雲頂高度以及 3 月 15 日鈷 137 沉降結果。(a)實線為雲底高度，色階為雲頂高度，單位:公尺。(b)調整風場後，僅乾沉降過程之結果。



續圖 3.2 (c)未調整風場前包含濕沉降過程之結果，(d)調整風場後且包含濕沉降的結果。

在每日的模擬中，12 日和 14 日由於沒有沉降量的觀測資料，純粹與 JAEA 模擬結果相比較，12 日的結果在 JAEA 主要都是往東北方沉降，而我們的結果則是可看到風向是由西北風轉為西南風的過程，但大致上主要的沉降量都是往福島電廠的東北方，且各個量級的分布距離結果相似，在 14 日的結果兩者的模擬皆可明顯看到受東北風和西南風的影響，然而我們系統的氣象資料解析度為 6 小時，會看到風場漸漸轉換的過程，以至於在福島西邊外海有較 JAEA 多的沉降量。15 日的比較如同上述。20 日模擬結果中影響陸地的縣市由北而南為岩手、宮城、福島、茨城和仿木，模擬與觀測的量值相近，最大差異不超多一個量級，但再往南模擬量值小於 10 的部分則有明顯低估。21 日模擬結果和觀測主要影響的部份是在福島電廠南邊，其模擬量值較大之處也與大的觀測量值群所在位置吻合。22、23 日我們系統的模擬結果主要往福島電廠南邊近海以及日本本州的東南方有一些沉降量的分布，其量值與觀測相當。25 日的沉降量以福島電廠為中心呈西北東南走向，主要影響福島縣的部分，與觀測量值相當。30 日本系統的模擬對陸地的沉降量較少，但實際上內陸部分仍有一些沉降量的出現。

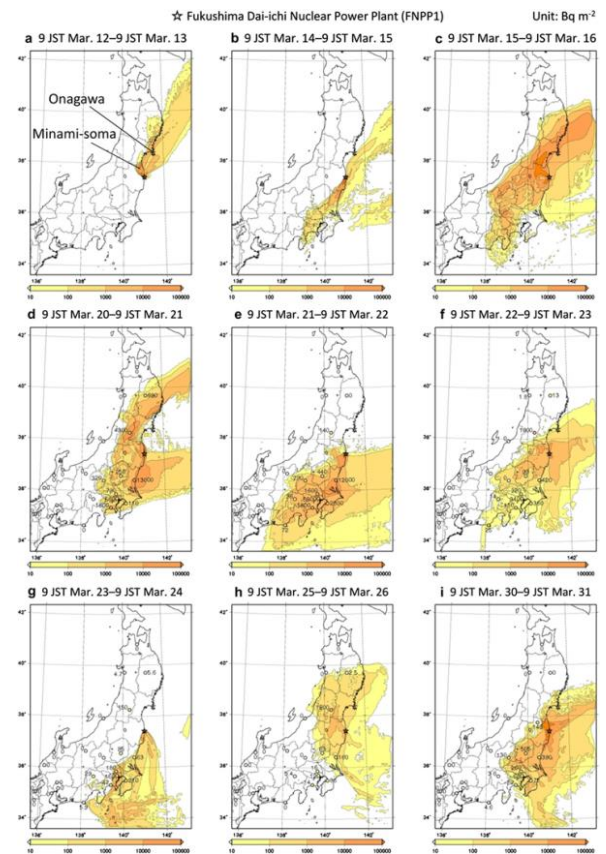


圖 3.3 JAEA 銻 137 每日沉降結果。單位: Bq/m²

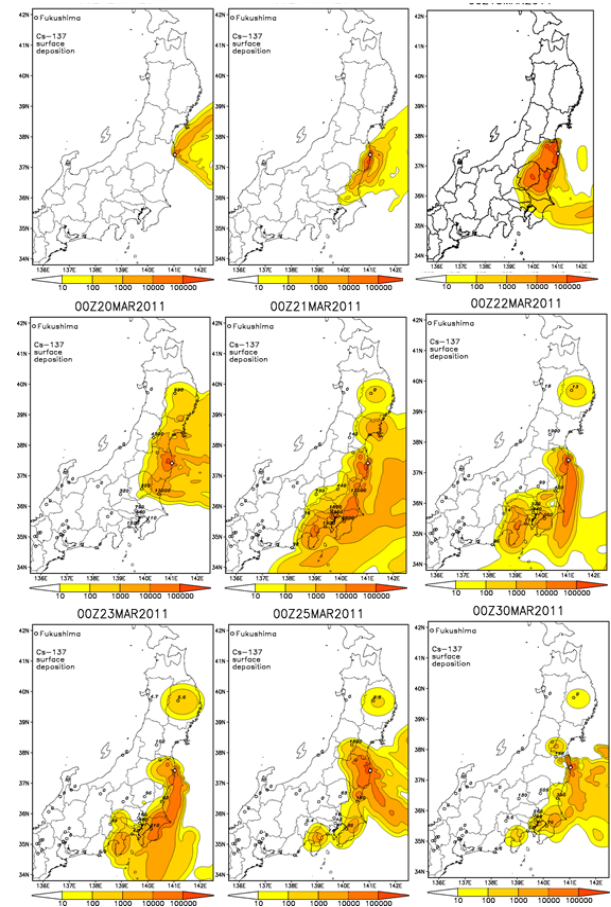


圖 3.4 台灣新一代劑量評估系統之銻 137 每日沉降結果。單位: Bq/m²

四、 結論

本系統為整合境內境外之即時作業化劑量評估系統，氣象資料主要採用的是作業化的全球預報模式及區域預報模式等資料，並透過本團隊自行開發之降尺度系統得到所關注區域之高解析度三維氣象資料，區域模式來源為中央氣象局的 WRF 模式，範圍為台灣地區、東亞地區，時間解析度較高，1 小時一筆，總預報長度為 84 小時，而全球預報模式如 NCEP GFS 模式的預報長度可達 384 小時，但時間解析度為 3 或 6 小時不等，本系統考慮作業資源及預報準度之下，採用 192 小時內每 6 小時的預報資料，雖會使得在風場快速變化時無法捕捉到局部的影響，但是在 6 小時風向表現無誤時，仍可將放射性物質的傳送、沉降結果呈現出來，更有方便、效率之優點。

五、 參考文獻

- Chino M et al. Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, 48(7):1129–1134.
- Katata, G., Terada, H., Nagai, H., Chino, M., 2012b. Numerical reconstruction of highdose rate zones due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.* 111, 2e12.
- Roland R. Draxler, “description of the hysplit_4 modeling system,” Air Resources Laboratory, Silver Spring, Maryland, Dec. 1997.
- Terada, H., G. Katata, M. Chino, and 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
- Yamada, T. and S. Bunker, 1988: Development of a Nest Grid, Second Moment Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT Brush Creek Data Simulation. *J. Appl. Meteor.*, 27, 562-578.