

應用 PUFF 數值模式於大屯火山 與龜山島火山灰傳送分布之研究

吳政忠¹ 鄭哲聖² 李孟陽³ 洪志誠³

¹海軍大氣海洋局 ²國防部國軍氣象中心 ³台北市立教育大學自然科學系

摘要

台灣位於太平洋火環之上，本島與周遭地區密布許多火山，以防救災觀點來看，持續的火山監測及數值模擬都是政府相關決策與應變單位迫切需要建立之手段，而藉由數值模擬提供火山灰傳送之時空分布與潛勢等資訊，對於未來災害警報發布與緊急應變將提供不可或缺的資訊。

本研究係台灣地區首次以數值模式模擬大屯火山與龜山島在不同季節及不同噴發高度等初始條件，討論火山灰飄移方向特性及落塵分布，模式運算採用來自美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)之再分析風場(Reanalysis2 data)，自 2000 年起至 2006 年為止，設定選取每月 5、15、25 日進行持續 48 小時計算與火山爆發指數為 3~4 之噴發規模模擬，討論冬季(DJF)與夏季(JJA)火山灰地面落塵以及空中飄移分布特徵。

關鍵字：PUFF 模式、火山灰、大屯火山、龜山島。

一、前言

火山噴發是地表最劇烈的活動之一，其破壞力令人怵目驚心，不僅嚴重影響週遭環境，所造成社會的危害更是人類難以承受，對於火山的研究除了希望瞭解形成機制和行為外，更希望因為瞭解火山進而能夠預測火山的活動與噴發，期望能把火山活動災害降至最低。

目前全世界分由 9 個火山灰警報中心(Volcanic Ash Advisory Center, VAAC)監控各地火山活動並發布警報，台灣及東亞地區由日本東京火山灰警報中心(Tokyo VAAC)監控火山活動及警報發布業務(日本東京負責區域，如圖 1)。

火山噴發所可能引起的災害包括：火山熔岩流、火山碎屑流、火山灰落堆積、火山氣體、火山泥流、山崩和海嘯等，其中火山灰落塵除直接對於當地及下風處數百公里內生命與財產

造成嚴重威脅外，也可能造成道路、排水系統及供水系統等公共工程損壞，同時因為火山灰顆粒細小，一旦吸入人體將造成呼吸系統嚴重傷害。一般而言，火山噴發產生岩漿、岩石碎片以及火山灰，而火山灰的定義是該物質平均粒徑 $< 2\text{mm}$ (Zimanowski, 2003)。

火山灰進入大氣層隨風傳送，除可能造成氣候改變之外，也可能因為火山灰顆粒微小導致吸入發動機造成飛安事故，因而影響或威脅鄰近數百公里範圍之空中交通安全，例如日本 Miyakejima 火山 2000 年 8 月 18-19 日噴發事件，初期因無預警情況使飛機直接遭遇火山灰雲造成損害，後續由於考量飛航安全，迫使班機更改航線，此次火山活動之火山灰造成飛機修復、航線更改等之直接及間接損失估計達 1,200 萬美元(Tupper, 2004)。

北台灣地區人口稠密，政經活動頻繁，有松山機場、桃園機場、基隆港皆為重要國內外

航線據點，又有核能發電廠、火力發電廠，倘若大屯火山、龜山島噴發，火山灰極可能嚴重威脅週遭數百萬民眾健康甚至生命財產安全，因此利用數值模擬火山活動產生的火山灰傳送沉降作用，對於台灣地區潛在威脅評估也就更加重要。

再者，目前對於地質時間之火山噴發相關研究，主要係藉由岩芯鑽探等地質證據推測當時噴發強度及火山灰落塵分布，期望藉由瞭解現今火山物質分布之地質證據，進而反映或推測未來可能發生災害之種類，並且成為評估未來火山活動影響範圍依據。但是藉由 PUFF model 運用不同時期大氣風場、輸入不同噴發

高度與參數等模擬，即可瞭解火山灰落塵分布範圍，例如模擬印尼 Toba 火山、北台灣地區火山等過去活動造成火山灰分布範圍與特性，協助確定地質研究、鑽探區域等劃定，俾利相關研究進行順遂。

本研究藉由數值模式，配合氣候風場特徵，模擬火山爆發指數(Volcanic Explosive Index, VEI)等級為 3~4 之噴發規模(Simkin and Siebert, 1994)，討論臺灣地區可能活動的火山，在冬季與夏季及不同的噴發高度(3km, 10km)等參數條件之下，火山灰在大氣中傳送路徑、方向與地面沉降分布狀況及特徵。

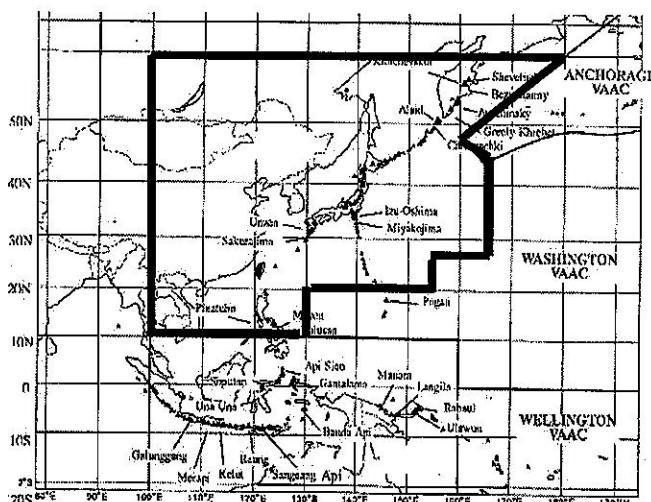


圖 1. 日本東京火山警報中心負責區域，圖中粗黑線所圍區域即為其負責區域，台灣為圖中黑色區塊（摘自 <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp>）。

Fig1. Surrounded by the Thick black lines of the regional that is Tokyo, Japan, Volcanic Ash Advisories responsible for the region. Taiwan is blocked area in the map. (Adapted from <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp>)

二、北台灣火山與板塊運動

近年研究與新的地球化學資料和地球物理證據發現(Lallemand et al., 1997)，菲律賓板塊與歐亞板塊之間的碰撞，在花蓮地區以南仍持續進行，而花蓮以北地區則轉為碰撞後的沉降和張裂作用，所以北台灣火山區(NTVZ)應該是屬於板塊碰撞後的張裂作用造成(Wang et al.,

1999)，也就是過去傳統認為北台灣地區火山已停止活動，但藉由現今地震與地球化學證據認為北台灣地區及沖繩海槽因張裂作用，將可能使得地底岩漿仍得以藉此管道上湧。

長久以來，各國均使用經驗法則認定活火山，或是以過去一萬年內有活動證據者，才可認定為活火山。但是火山活動極不規律，即使不符合經驗法則的火山也可能具有爆發潛在可

能，因此目前學界傾向採用「現象定義」，也就是火山下方若仍有岩漿庫存在，就應認定屬活火山(Szakacs, 1994)。

大屯火山群的後火山活動如溫泉、噴氣孔等，仍十分強烈，由大屯火山的 He 同位素比值分布判斷，顯示大屯火山下方有岩漿庫存在 (Song et al., 2000)，經濟部中央地質調查所 2003 年在大屯火山群布放 8 個三維地震儀，觀測顯示大屯火山群有相當豐富的微震發生，雖然缺乏直接證據顯示大屯火山底下有岩漿庫存在，但由過去該區域地熱研究與地震停止的深度判斷，地底岩漿庫位置應在深於地表 7km 以下之處(Konstantinou et al., 2007)。

而同屬北台灣火山群的龜山島，位於台灣東北部蘭陽平原，被認為是南段沖繩海槽張裂前緣，目前除仍持續擴張外，且發現附近海底熱液活動頻繁，熱流(high heat flow)及密集地震發生、熱液活動(active hydrothermal mound)等證據支持張裂作用仍持續進行，藉由龜山島火

山活動產生的捕獲岩進行熱螢光定年(thermoluminescence, TL)測定，研判龜山島最後火山活動少於 7000 年(Chen et al., 2001)，而 1 萬年以內曾噴發的火山被視為活火山。

綜合上述觀點，北台灣火山區(NTVZ)是由於張裂作用產生，台灣北部的張裂作用正持續發育中，若地殼下方有岩漿供應形成岩漿庫，則北台灣火山群仍有可能提供管道使岩漿噴發至地表(宋，2005)。

三、台灣氣候分析

國內學者研究分析經濟部中央地質調查所民國 88 年取得的關渡、蘆洲、五股、士林井等 4 處岩芯資料，推測大屯火山群在 1~2 萬年前有過噴發，並在 3000 年前還會有輕微活動，同時依據火山灰物質沉積分布研判，當時大屯火山群應於東北季風盛行時期噴發(Chen & Lin, 2002)。

表 1. 淡水、中正機場、新竹氣象測站 1979-2002 年風向頻率及風向表。

Table 1. Tan-Sui, CKS airport, Hsin-chu weather stations in the period of 1979-2002 wind direction and frequency.

風向	淡水		中正機場		新竹	
	頻率%	風速 m/s	頻率%	風速 m/s	頻率%	風速 m/s
N	4.83	2.3	7.91	8.4	6.31	1.3
NNE	7.31	2.25	7.54	8	8.93	3.37
NE	14.14	2.02	19.21	9.78	23.04	2.26
ENE	7.16	2.63	13.73	10.5	7.39	2.58
E	4.38	2.3	7.38	7.83	6.1	1.91
ESE	5.92	2.75	4.05	4.3	3.73	1.96
SE	9.06	1.94	1.98	2.1	3.21	1.82
SSE	8.11	1.97	3.58	3.8	2.26	1.3
S	5.16	2	6.16	6.54	2.68	1.4
SSW	3.15	2	2.54	2.7	2.95	1.6
SW	3.73	2.3	6.81	7.23	7.08	2.14
WSW	5.08	3	7.85	8.33	7.52	2.62
W	5.83	1.73	7.33	7.78	5.91	1.88
WNW	8.14	1.82	2.2	13	3.66	1.3
NW	3.82	1.8	2.73	2.9	4.79	1.1
NNW	4.24	2.2	2.83	3	4.4	1.2
平均風速		2.19		6.63		1.86
東北風系發生頻率	33.4		48.4		45.7	

關於大屯火山是否真於東北季風時期噴發，應可藉由對照氣候資料討論此一觀點，根據淡水、中正機場、新竹氣象測站 1979-2001 年風速及風向頻率統計表顯示(如表 1)，3 處測站全年平均北北東~東北東風向達 42.5% 的風向頻率(楊, 2004)，顯示東北風在此地扮演著重要的角色，另由中央氣象局東吉嶼測站氣象統計資料顯示台灣海峽每年 10 月至翌年 5 月為東北季風盛行時期且時間長達 9 個月(吳, 2005)。

由圖 4 氣候風場分析，發現冬季東亞地區(含台灣)近地面盛行北至東北風，北緯 20 度以北之處在 700hPa(3000m)以上高空即進入西風帶，因此依據氣象統計資料推斷，大屯火山等北台灣地區火山於東北季風時期噴發機率超過 42%，但是由於目前發現火山灰沉積物均位於台北地區，仍無法判斷大屯火山當時噴發高度與噴發規模，亦即火山灰是否曾進入高空西風帶造成火山灰地面往東沉降分布，或是當時噴發高度小於 3000 公尺而僅受低層東北季風影響。

四、模式簡介與個案分析模擬

(一) 模式簡介

PUFF model 是由阿拉斯加大學費爾班分校(University of Alaska Fairbanks)1989 年田中教授(Prof. H. Tanaka)發展，藉由輸入火山高度、位置、數值預報風場等資料，快速有效地計算火山灰在大氣中平流、擴散、沉降等作用，輸出資料為一般通用之 netCDF 格式，該模式目前為美國空軍氣象聯隊與安克拉治火山灰警報中心、阿拉斯加火山觀測站等單位使用。

PUFF model 以 C 和 C++ 程式語言撰寫在 Linux 和 Unix 平台發展，也可以在 Solaris 與 MacOSX 平台使用，她採用拉格朗日法計算每個積分時間(time step)質點之向量，一般常用拉格朗日法觀點處理質點在自由液體表面變化，即追蹤自由液面之特定質點(李, 2006)，原始拉格朗日法(Lagrange form)寫為：

$$\left\{ \begin{array}{l} X_k^n = X_k^{n-1} + u_k \Delta t \\ Y_k^n = Y_k^{n-1} + v_k \Delta t \end{array} \right.$$

式中 u_k, v_k 為自由液面上標示質點的水平 X, Y 方向速度，n 及 n-1 表示連續的兩個時段， Δt 為積分時間亦即數值計算上時間增加量(time step)。

而 Lagrange form 在 PUFF model 除了考量質點隨時間變化，還要計算風場對於質點變化的影響，因此主要方程式(governing equation)改寫為(Searcy, 1998)：

$$R_i(t + \Delta t) = R_i(t) + W(t)\Delta t + Z(t)\Delta t + S_i(t)\Delta t$$

其中 R_i 為質點位置，W 為當地風場，Z 為擾動傳播量， S_i 為質點降落量。

亦可寫成下列方式(Tanaka et al., 2002)

$$\left\{ \begin{array}{l} r_i(0) = S, \quad i = 1 \sim M, \quad \text{for } t = 0 \\ r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + V\Delta t + D\Delta t + G\Delta t, \\ \quad i = 1 \sim M, \quad \text{for } t > 0 \end{array} \right.$$

其中 $V=(u, v, w)$ ，也就是 V 表三維風場，D=(dh, dh, dv)，是三維的擴散係數，G 為重力造成之質點沉降速度。

(二) 個案分析模擬

國外已有學者利用 PUFF model，研究火山灰傳送與落塵，例如日本學者 Tanaka 等人以 PUFF model 模擬日本北海道「有珠」(Usu)火山，於 2000 年 3 月 31 日噴發事件(Tanaka et al., 2002)，以及模擬阿拉斯加地區季節性火山灰飄送狀況(Papp et al., 2002)，均有良好成效。

由菲律賓 Pinatubo 及日本 Usu 火山噴發事件來看，火山灰落塵與高空風場有密切相關，尤其是 1991 年 6 月 15 日菲律賓 Pinatubo 噴發事件，當時正好有第 5 號颱風「詠妮亞」(YUNYA)通過呂宋島，但是由海洋岩心鑽探獲得火山灰沉積物分布，及距火山口越遠沉積的火山灰物質顆粒越細小(Wiesner, 2005)，研判 Pinatubo 火山灰沉降過程中，雖然受到各層風場影響稍有改變傳送方向，但主要火山灰傳送與沉降方向仍由噴發高度之風場決定，未受颱風環流影響。

相對 Pinatubo 火山噴發高度達 40km，火山灰雲直徑在 4-5 小時後就擴散達 750km，日本北海道 Usu 火山在 2000 年 3 月 31 日造成噴發事件，該次噴發事件自 0407Z 開始至 0900Z 結束，持續至少 5 小時，同時噴發顆粒 95% 集中

在 $2 \mu\text{m}$ ~ 2cm ，噴發高度在 3000 公尺左右，藉由觀測火山灰地面沉降分布，同樣發現火山灰順著風向飄送移動 (Tanaka et al., 2002)。

台灣、菲律賓及南海，屬熱帶或亞熱帶氣候，風場狀況與北海道、阿拉斯加、阿留申群島等高緯度地區不同，且本次研究採用 NCEP Reanalysis2 風場，亦與國外研究學者不同，因此以菲律賓 Pinatubo 火山噴發進行相關模式參數測試，以求取最佳模擬結果。

菲律賓 Pinatubo 火山在 1991 年 6 月噴發，號稱為本世紀第 3 大噴發規模(Wiesner et al.,

2004)，但迄今並未有學者利用 PUFF model 作數值模擬分析研究，近年由南海海洋岩芯鑽探與研究認為 1991 年 6 月 15 日 Pinatubo 火山噴發事件，在呂宋島及南海中部，產生大量且大範圍的中酸凝灰岩(co-ignimbrite)火山灰堆積層，當時呂宋島附近對流層頂盛行東風，中對流層盛行西風，低層則盛行西南風，在火山灰飄移降落過程中，在各層風場交互作用影響下，造成火山灰降落堆積在南海一帶(如圖 2)(Wiesner et al., 2004)。

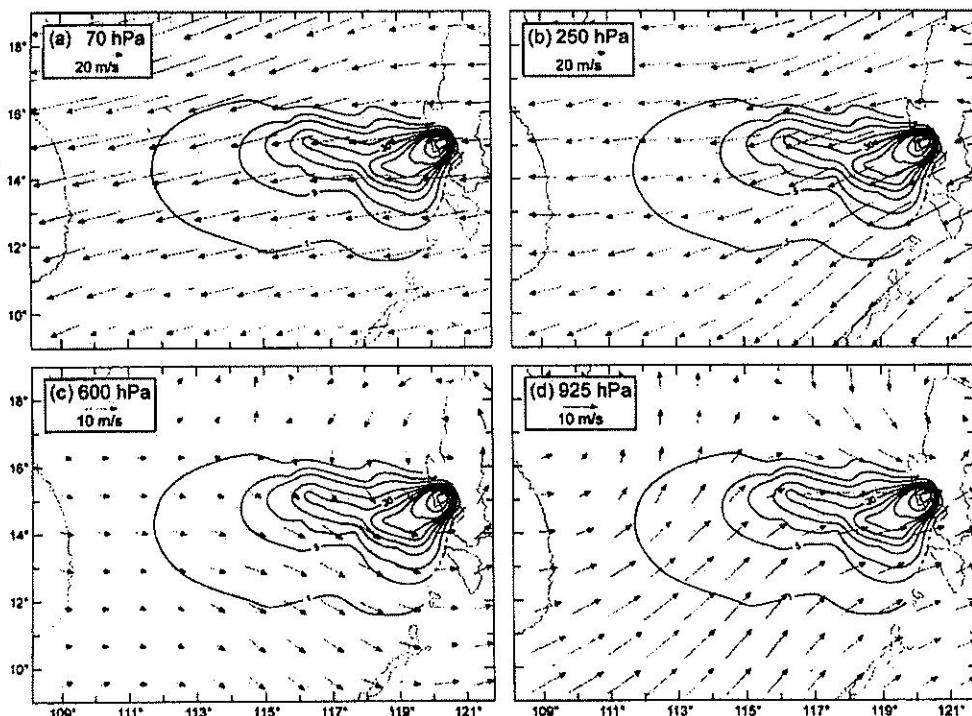


圖 2. 1991 年 6 月 15 日 Pinatubo 火山噴發當時各空層環境風場，風場為 ECMWF ERA-15 reanalysis data，等值線表落塵堆積厚度(mm)(摘自 Wiesner et al., 2004)。

Fig 2. June, 15, 1991 Pinatubo volcanic eruption at the time of the environment wind field, which is ECMWF ERA-15 reanalysis data. Contour is ash fallout thickness (mm). (Adapted from Wiesner et al., 2004)

由上述個案研究文獻討論得知下列訊息可作為模式參數敏感測試依據：

1. 噴發最大高度為 40km (Holasek et al., 1996)。
2. 噴發 4~5 小時後，火山灰蕈狀雲直徑已達

750km (Holasek et al., 1996)。

3. 由海洋岩芯鑽探得知火山灰粒徑應為 $2 \mu\text{m}$ ~ $3600 \mu\text{m}$ (Wiesner et al., 2004)。

以下僅就下列參數進行測試（如表 2）：

表 2. 模擬參數測試表(PuffUAF User's Manual, 2006)。

Table2. Simulation parameters table (Adapted from PuffUAF User's Manual, 2006).

eruptHour	PlumeMax (m)	PlumeHwidth (Km)	nAsh	plumeShape	runHours	ashLogMean
9	35000	750	21600	p	48	-4
ashLogSdev	diffuseH	diffuseZ	sedimentation	dtMins	gridOutput	repeat
1	*	*	*	*	0.25x3000	3

表 2 所述 eruptHour 表噴發持續時間，PlumeMax 表最大噴發高度，PlumeHwidth 表火山灰傘狀雲直徑，nAsh 表火山灰顆粒數。由於本次研究均係討論火山灰相對濃度，而相對濃度係由 nAsh 決定為無因次單位，若 nAsh 太少可能導致相對濃度下降而無法分析，經過多次模擬研究發現該值設定 21600 較佳。plumeShape 表火山噴發柱形狀，p 表設定為 poisson，runHours 表模式設定運算時間，ashLogMean 表火山灰平均半徑，ashLogSdev 表標準差 (ashLogMean=-4, ashLogSdev=1 表火山灰粒徑為 $10^3 \sim 10^5$ meter)，較接近 Wiesner 與 Tanaka 等人討論之火山灰沉積粒徑)，diffuseH 表水平方向擴散係數(m^2/s)，diffuseZ 表垂直方向擴散係數(m^2/s)，sedimentation 沉降作用(使用之物理參數計 constant, stokes, Reynolds 3 種)，dtMins 表計算積分時間，gridOutput 表輸出格點之水平方向間距(度)*垂直高度間距(meter)，repeat 表計

算次數再依設定重複計算次數取其平均，其餘參數以 * 表示採用 PUFF model 內定值(Peterson, et al., 2006)。

依表 2 所列參數，模擬得到 1991 年 6 月 15 日 Pinatubo 火山噴發事件火山灰降分布(如圖 3A)，為求瞭解火山灰粒徑與沉降分布距離之關係及火山灰沉降物質顆粒大小分布特徵為何？因此在火山灰飄移軸線設定 A、B、D、E 四點，同時也增設 C 點以瞭解火山灰飄送軸線與其兩側火山灰粒徑差異，圖形檢視與分析沉降顆粒分布(如圖 3B)，A 點距離噴發源地最近，因此沉降顆粒最大並且顆粒逐漸隨噴發距離增加而減小；但是 C 點沉降顆粒為最小，顯示火山灰雲隨著高空風向飄送主要噴發物質，大致呈由東往西輸送軸線分布，同時在火山灰雲傳送輸送過程，大顆粒火山灰物質也不斷掉落，且落塵粒徑分布極不平均。

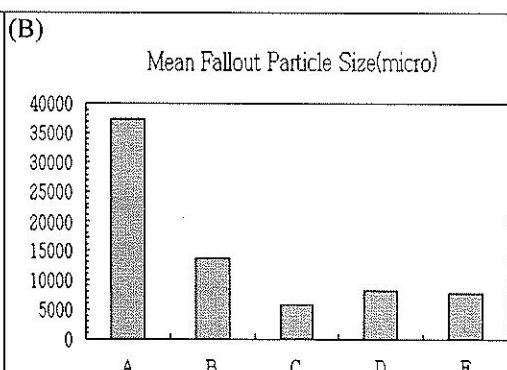
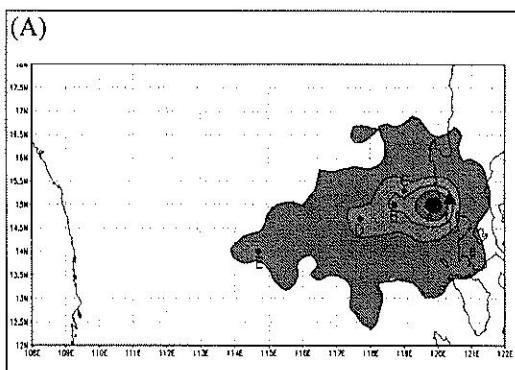


圖 3. (A)模擬 Pinatubo 火山 1991 年 6 月 15 日噴發，火山灰沉降分部及區域點位選取示意圖；(B)分析模擬各點位沉降火山灰粒徑分布圖。

Fig 3. (A) Simulation of Pinatubo volcano June 15, 1991 eruption. The colored area is volcanic ash fallout regional. Dot symbol is selected point to analysis ash particle size. (B) Analysis of simulation of the point particle size distribution of volcanic ash fallout.

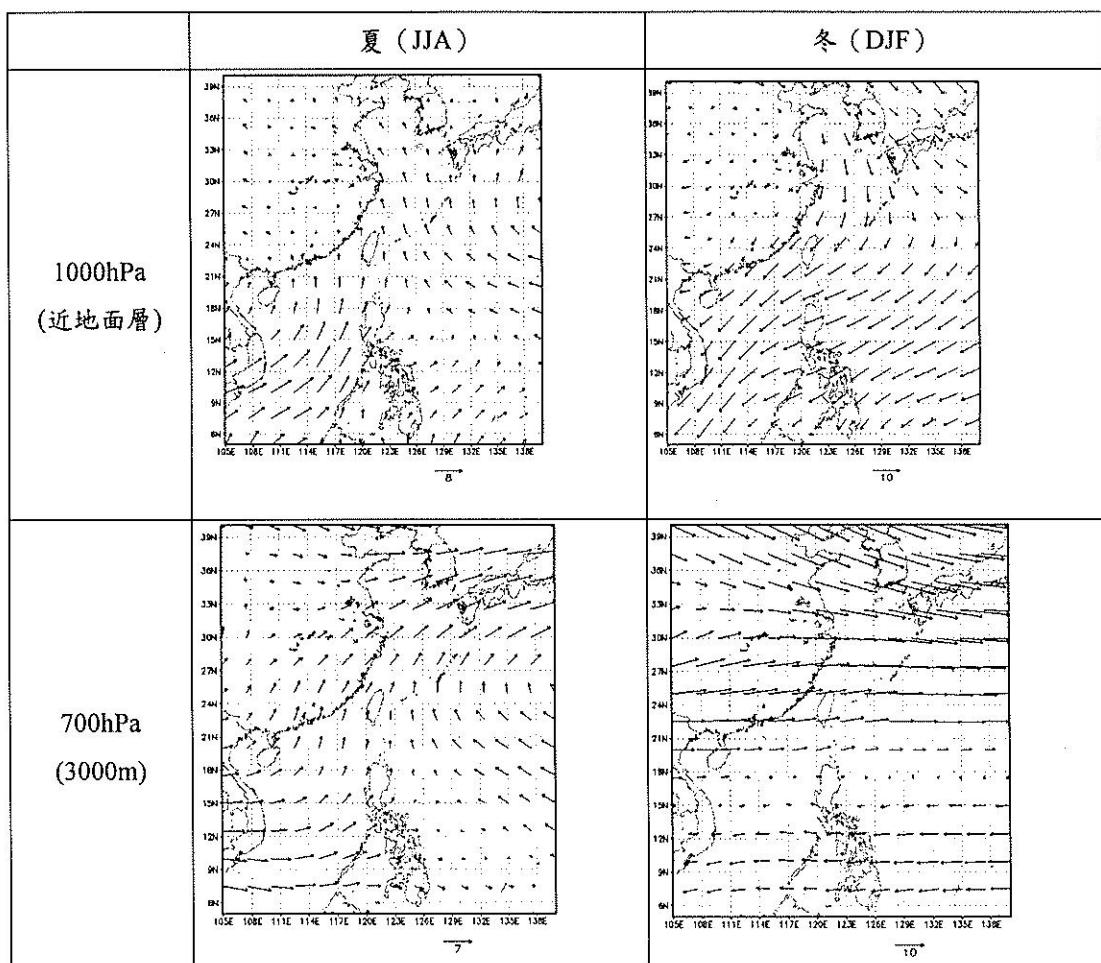
五、氣候風場分析

由於風場與火山灰飄移有密切關聯，因此為求瞭解火山灰傳送方向及特徵，乃依季節變化將東亞地區氣候風場分為：夏季(6、7、8月，JJA)與冬季(12、1、2月，DJF)，本次研究採用2000至2006年NCEP Reanalysis2季節平均風場作模擬研究，所需之背景風場解析度為 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，由2000至2006年7年際季節變化說明火山灰傳送特徵。

近年國外學者藉由氣候風場模擬火山灰傳送，發現可能會產生過於平滑及偏移的現象(Papp et al., 2002)，因此，本研究參照氣象常用玫瑰圖製作方式，將每次輸出模擬所得火山灰在地面主要沉積分布方向分成北、東北、東、

東南、南、西南、西及西北等8個方位繪製玫瑰圖；每圈表示火山灰地面沉降機率，如此在判斷火山灰地面沉降分布有助修正Papp等學者發現過於平滑缺失。

由第二節所述瞭解台灣地區雖未見歷史時期的火山噴發活動，但大屯火山仍有岩漿庫存在及龜山島最後一次火山活動約為7000年左右，因此仍選取大屯火山及龜山島為模擬對象，參數設定與地理位置(如表3)，火山灰雲直徑由噴發高度推得(Sparks et al., 1997)，另模式採用地形解析度與模式表現關聯十分重要，因此PUFF模式採用30秒地形，PUFF模式輸出格點水平解析度為0.25度，垂直解析度為2000m，如此應可表現火山灰在台灣地區飄移分布特性。



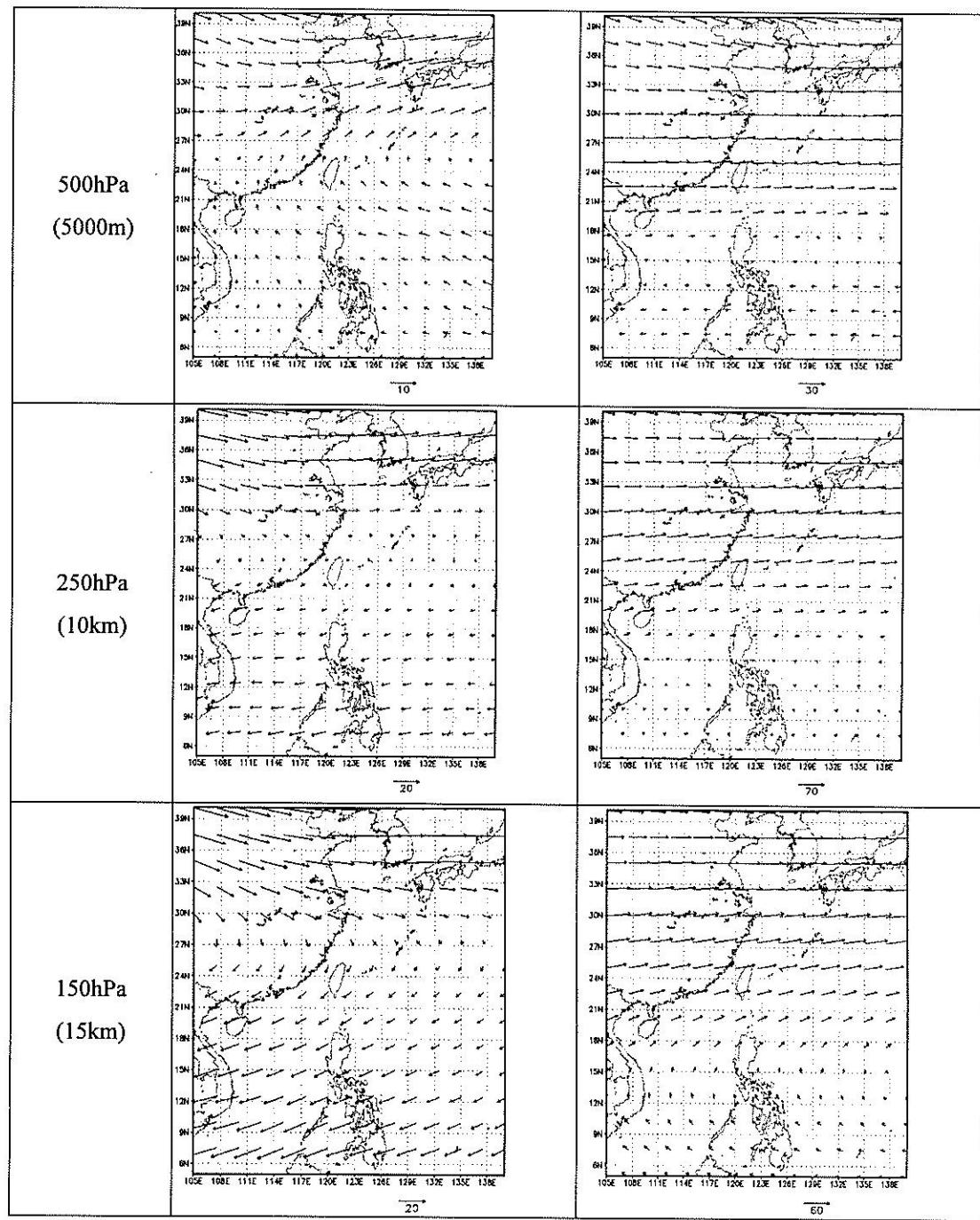


圖 4. 2000~2006 年各季節與各空層平均風場。

Fig 4. The period of 2000- 2006, winter and summer average wind field.

表 3. 模擬研究火山名稱與說明。

Table 3. Simulation volcano name, simulated eruption height, diameter of volcanic ash clouds and the shape of eruption.

	模擬噴發高度	模擬火山灰雲直徑	模擬噴發形狀
龜山島 Kuei-Shan Tao	10km	100km	poisson
	3km	2km	exponential
大屯火山 Datun	10km	100km	poisson
	3km	2km	exponential

台灣地區冬季時期低層為北至東北風，但是在 3000m 以上高空即盛行西風，夏季則在 5000m 以下均為西南至東南風等南風系為主，春、秋二季為北風與南風互易，因此依據氣候特性僅討論冬、夏二季及 3km 與 10km 兩個不同噴發高度，每 10 天模擬 1 次，每次模擬 48 小時，因此每個季節產生 63 個模擬噴發事件，再取其季節平均值及 7 年全年平均值，分別討論火山灰落塵及空中傳送分布特徵。另外由於火山灰總量實難以掌握，因此模擬改以藉由設定火山灰粒徑與火山灰雲高度等特性，進而分析討論火山灰地面與空中分布濃度，模式輸出此一數據係由計算輸入之火山灰粒子數(nAsh)而得，故本研究討論之相對濃度無單位，另本次研究討論火山灰圖資均以 GrADS 軟體繪製。

六、台灣地區大屯火山、龜山島模擬成果

(一) 夏季

台灣地區地面與高空夏季均盛行西南至東南風，設定噴發高度 3000m、10000m 分別討論火山灰地面落塵分布，另外針對噴發高度 10000m 討論火山灰在不同空域飄移分布狀況。

1. 火山灰地面分布模擬

台灣地區夏季低層大氣受西南氣流影響，以南至西南風為主，因此假若噴發高度 3000m，則由圖 5A 及 5B 濃度最高的區域顯示判斷，大屯火山、龜山島均受到南方氣流影響，地面落塵最大濃度落在火山口北方。

假若噴發高度 10km，則因高層 150hPa 大氣盛行東北風，圖 5C 大屯火山可能受到高低層風場交互影響，因此火山灰落塵以大屯火山為中心，同心圓向外分布但略微向北偏移，至於龜山島由圖 5D 顯示地面落塵濃度最高區域，也是向北偏移分布但受到高空東北風影響而偏向左側（宜蘭蘇澳）。

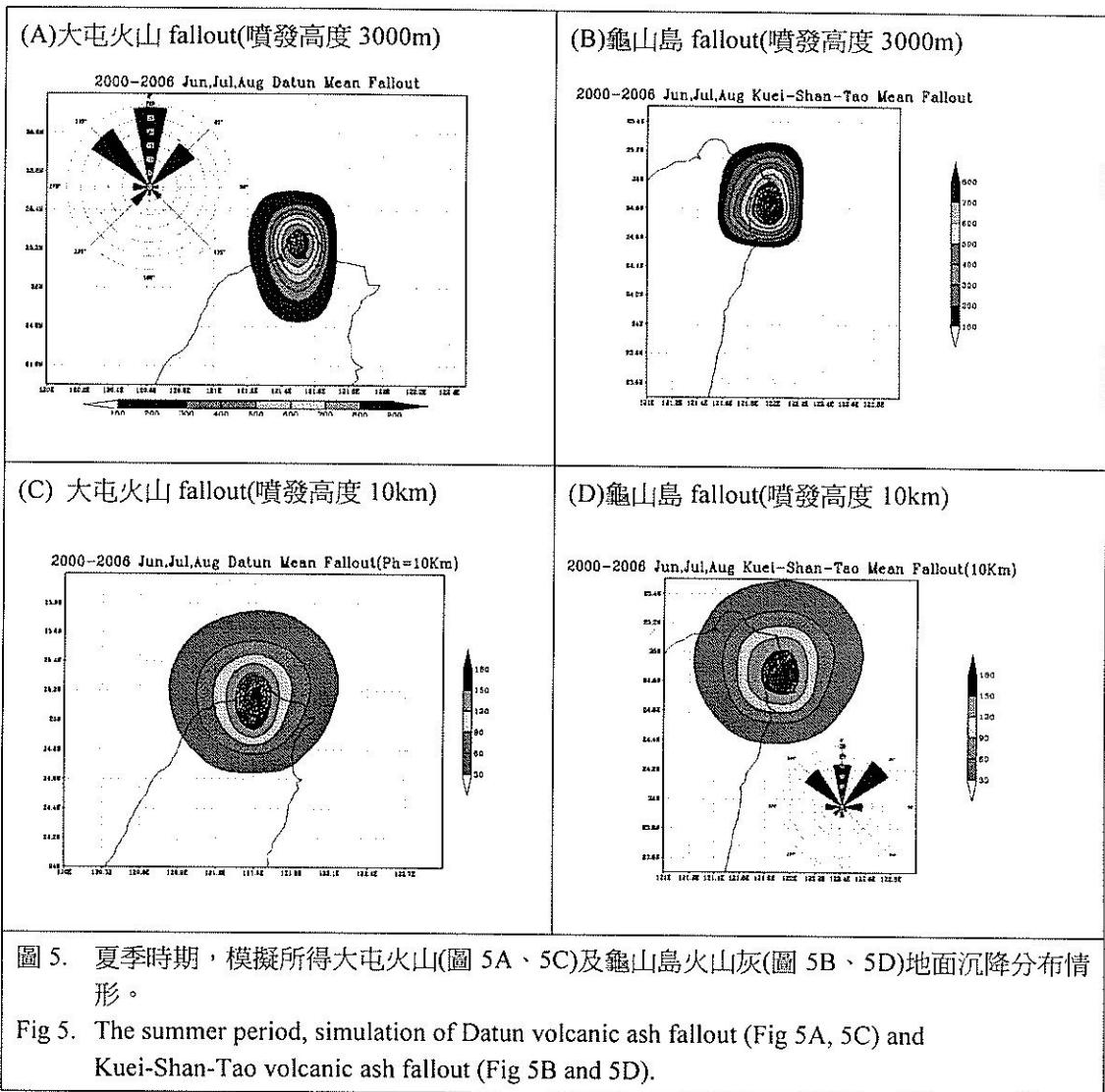
由於落塵分布係將 63 次個案平均表現過於平滑不易顯示差異特性，若將每次模擬所得落塵方向統計以玫瑰圖表示，則發現大屯山與龜山島落塵主要仍呈現往東北至西北方分布，與風場表現相當類似。

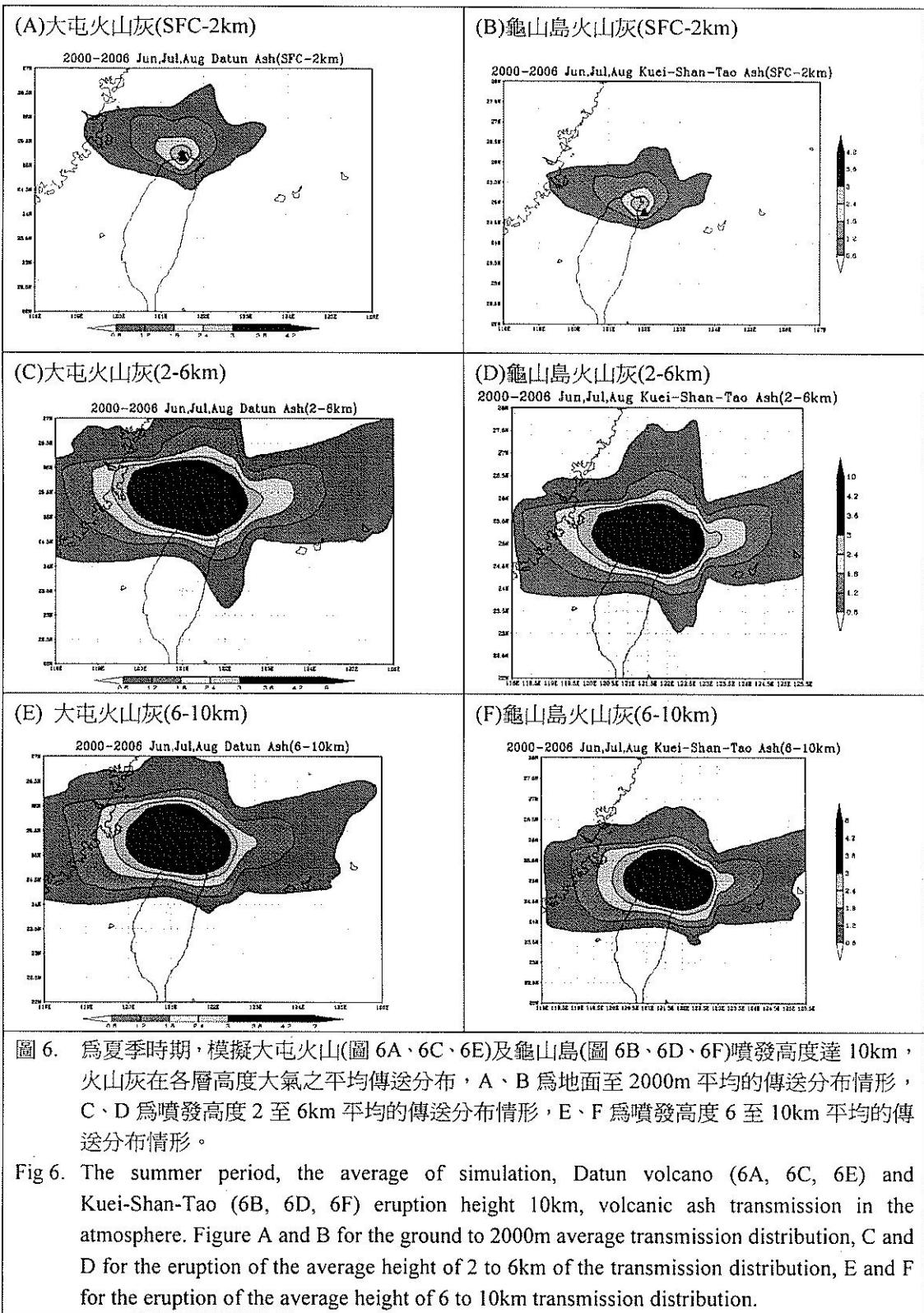
2. 火山灰空中飄移模擬

雖然設定模式每 2000m 垂直高度輸出火山灰飄移資料，本次研究將高度分為地面至 2km、2 至 6km 及 6 至 10km 三層空域分別平均，分析討論火山灰在太氣中的飄移趨勢。

圖 6 顯示，夏季時期如果大屯火山、龜山島噴發高度達到 10km，由模擬結果圖 A 與 B 顯示受到 5000m 以下盛行西南至東南風，而 5000m 以上轉受東北風影響，因此圖 C 至 F 均顯示火山灰在台灣中部以北至台灣北部海域一帶飄移。

由於火山灰地面落塵粒徑與空中飄移之火山灰粒徑差異甚大，因此火山灰在空中飄移受到風場影響更為明顯，所以未來夏季時期倘若火山噴發高度在 10km 以上空域受到風場影響造成火山灰在各空域飄移方向不一致。





(二)冬季

台灣地區地面冬季盛行東北季風，高空西風帶非常明顯，設定噴發高度 3000m、10000m 分別討論火山灰地面落塵分布，另外針對噴發高度 10000m 討論火山灰在空中傳送分布狀況，以明瞭對於地面與空中飛航威脅為何？

1. 火山灰地面分布模擬

由圖 5 顯示，台灣地區冬季 3000m 以下盛行北至東北風，因此假若噴發高度 3000m，從圖 7A 及 7B 來看，大屯火山、龜山島均受到東北季風影響，圖中濃度最高的區域顯示大屯火山地面上落塵明顯分布在火山口南方，而龜山島

火山灰地面上落塵明顯分布在火山口西南方，且地面上落塵方向玫瑰圖均出現往西南方分布趨勢，但是當火山噴發高度達 10 公里(圖 7C、D)已經進入西風帶，火山灰隨西風往東飄移，因此火山灰地面上落塵主要分布於火山東側，顯示火山噴發所達高度之風場明顯影響火山灰落塵地面分布狀況。

2. 火山灰空中飄移模擬

假若噴發高度 10km，因為冬季台灣地區高層 700hPa(3000m)以上大氣即為盛行西風，所以大屯火山及龜山島火山灰在低層至高空飄移方向，均一致呈現由西往東傳送分布(圖 8C、D)。

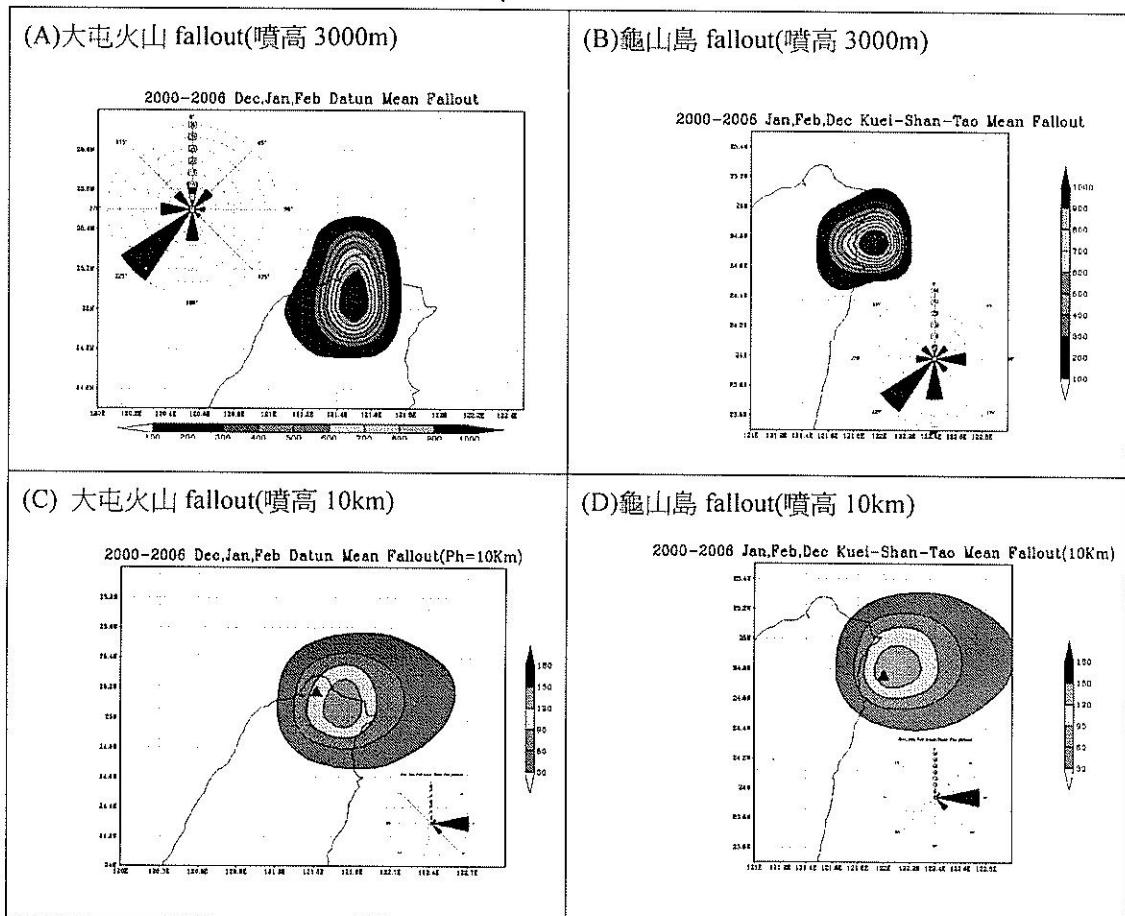


圖 7. 模擬冬季時期大屯火山(圖 7A、7C)及龜山島火山灰(圖 7B、7D)地面沉降分布情形，A、B 為噴發高度達 3000m，C、D 為噴發高度達 10km。

Fig 7. Simulation winter period Datun volcanic ash fallout (7A, 7C) and Kuei-Shan-Tao volcanic ash fallout(7B, 7D). Figure A and B is the eruption height 3000m. Figure C and D is the eruption of 10km.

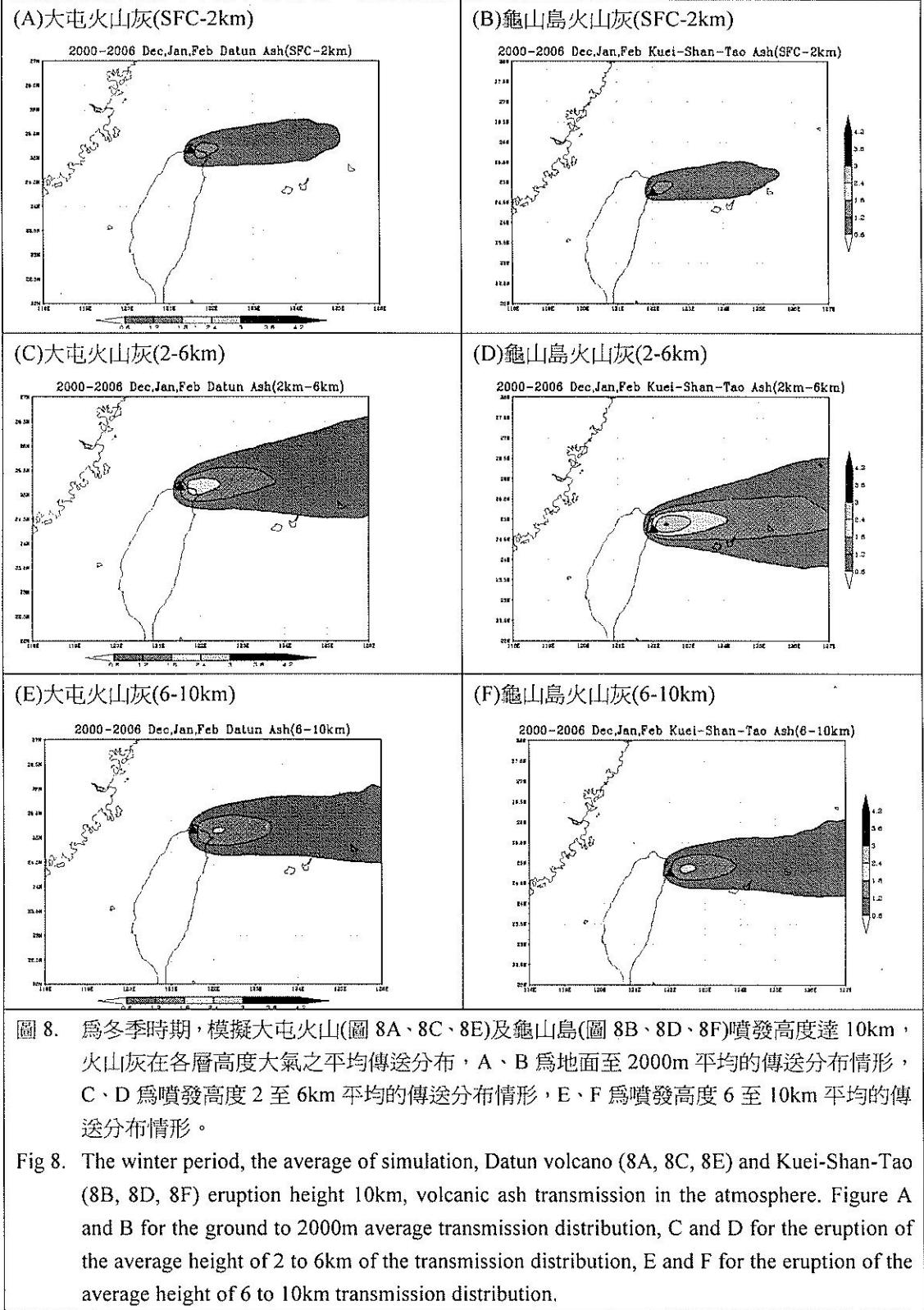
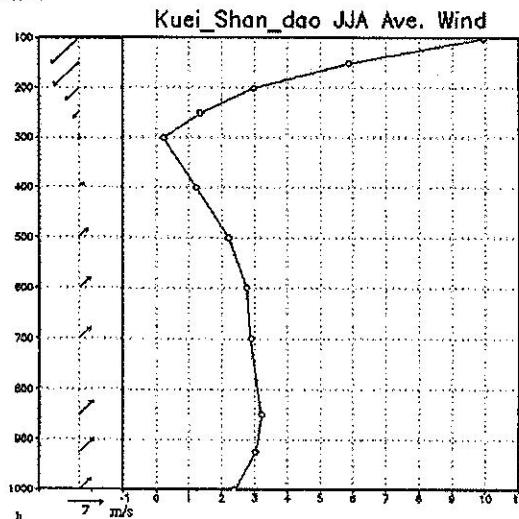


圖 9 顯示龜山島之地面至 100hPa(15km)冬季與夏季年平均垂直風場剖面圖，由圖所示夏季平均風速微弱(圖 9A)，且 1000hPa 至 400hPa 盛行西南風，300hPa 以上風向轉為東北風且風速增強。

冬季時期 700hPa 以下為東北風，700hPa (3000m)以上即進入西風帶，且風速隨高度增加

逐漸增強，風速在 250hPa 處達最強(圖 9B)，由圖 9B 顯示冬季風速較強外，各空域風向變化較少，所以由模擬顯示夏季火山灰在各層空域傳送方向轉變較多，而冬季則明顯受到地面東北季風與高空西風影響，火山灰飄移軌跡可預測度較高。

(A)夏季龜山島垂直風場剖面圖



(B)冬季龜山島垂直風場剖面圖

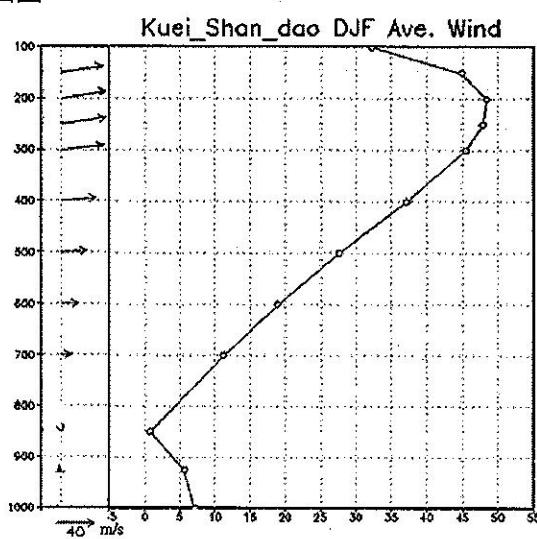


圖 9. 龜山島夏季(A)與冬季(B)平均風場之垂直剖面圖，圖中縱軸為大氣垂直高度氣壓值(百帕, hPa)，橫軸表各層風速值(m/s)，箭號表風向，箭號長短即為風速大小(風速 m/s)可參考右側風速數值分布。

Fig 9. Kuei-Shan-Tao in summer (A) and winter (B) the average of the vertical wind profile.

七、結論

- (一) 模擬分析顯示噴發高度越低，落塵分布受低層風場影響相當明顯，同時落塵影響也較為侷限在火山口附近區域，冬季時期大屯火山落塵可能影響至桃園、新竹一帶，龜山島落塵則可能影響蘇澳一帶。
- (二) 冬季受 700hPa 西風帶影響，大屯火山、龜山島噴發高度達 10km 進入西風帶，則火山灰受高空西風帶影響向東傳送，將影響台灣與日本、琉球、夏威夷之間太平洋空中航線交通安全。
- (三) 台灣夏季低層盛行西南風至東南風，400hPa 以上高層盛行北至東北風(圖 9A)，若龜山島與大屯火山噴發高度達 10km，則火山灰地面落塵分布於台灣北部地區，空中飄移範圍分布在台灣、福建至琉球一帶，地面與空中較不一致且空中飄移路徑較散亂，火山灰可能影響北台灣至福建地區與琉球一帶飛航安全。
- 迄今預測火山爆發最成功的例子是 1991 年菲律賓和美國合作監測 Pinatubo 火山並提出預警撤退居民與美軍基地，將災害損失減至最低程度，由近年關於火山活動相關研究瞭解，任何單一的觀測方法或是衛星監測均無法滿足與解決有關火山灰雲的追蹤等問題(Tupper, 2004)，但未來可以藉由 PUFF Model 等數值模式評估火山灰噴發運動路徑、覆蓋範圍，進而建立火山灰活動地面災害潛勢圖、發布空中航線影響警報等，成為擬定災害應變策略的重要依據之一。

八、參考文獻

- 宋聖榮、羅偉、蔡裕偉、曹恕中、謝有忠，2005，大屯山火山群和龜山島地區的潛在火山災害，大台北地區火山活動與山腳斷層研討會論文集。
- 吳政忠、呂芳川、陳文定、趙尊憲、莊漢明，2006，東北季風時期台灣鄰近海域風場預報之研究，氣象學報，第 46 卷，第 2 期，第 29-43 頁。

- 李政賢、陳志欣、黃清哲，2006，波浪與潛沒平板之交互作用，海洋工程學刊，第 6 卷，第 2 期，第 41-62 頁。
- 楊美萍，2004，桃園縣海岸地形變遷之研究，國立臺灣大學地理環境資源研究所碩士論文。
- Chen, C. H., J. S. Shen, 2005, A Refined Historical Record of Volcanic Eruptions around Taiwan: Tectonic Implications in the Arc-continent Collision Area, TAO, Vol. 16, No. 2, pp. 331-343.
- Chen, C. H., S. B. Lin, 2002, Eruptions Younger Than 20 Ka of The Tatun Volcano Group as Viewed From The Sediments of The Sungshan Formation in Taipei Basin, Western Pacific Earth Sciences, Vol. 2, No. 2, pp. 191-204.
- Chen, Y. G., W. S. Wu, C. H. Chen, T. K. Liu, 2001, A Date for Volcanic Eruption Inferred from a Siltstone Xenolith, Quaternary Science Reviews, Vol. 20, pp. 869-873.
- Konstantinos I. Konstantinou, Cheng-Horng Lin, Wen-Tzong Liang, "Seismicity characteristics of a potentially active Quaternary volcano: The Tatun Volcano Group, northern Taiwan", J. of Volcanology and Geothermal Research, Vol.160, pp. 300-318, 2007.
- Lallemand, S. E., H. H. Tsien, 1997, An introduction to active collision in Taiwan, Tectonophysics, Vol. 274, pp. 1-4.
- Lin, C. H., K. I. Koantinou, W. T. Liang, H. C. Pu, Y. M. Lin, S. H. You, Y. P. Huang, 2005, Preliminary analysis of volcanoseismic signals recorded at the Tatun Volcano Group, north Taiwan, Geophysical Research Letters, Vol. 32, L10313.
- Papp, K. R. , 2002, An Analysis of Volcanic Ash Plume Movement and Dispersion within The North Pacific, Thesis for the Degree of Master of Science, University of Alaska

- Fairbanks.
- Peterson, R., 2006, Puff UAF User's Manual Version 2.2.0, University of Alaska Fairbank, Fairbank, Alaska.
- R. E. Holasek, S. Self, A. W. Woods, 1996, Satellite observations and interpretation of the 1991 Mount Pinatubo eruption plumes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101(B12), No. 27, pp. 635–655.
- Sparks, R. S. J., M. I. Bursik, S. N. Carey, J. S. Gilbert, L. S. Glaze, H. Sigurdsson, A. W. Woods, 1997, *Volcanic Plumes*, pp. 38-56, 278-306, John Wiley, New York.
- Searcy, C., K. Dean, W. Stringer, 1998, PUFF: A high-resolution volcanic ash tracking model, *J.of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 80, pp. 1-16.
- Simkin, T., L. Siebert, 1994, *Volcanoes of the World*, Smithsonian Institution, Global Volcanism Program, pp.1-99.
- Song, S. R., T. Y. Yang, Y. H. Yeh, S. Tsao, H. J. Lo, 2000, The Tatun volcano group is active or extinct? , *J. of The Geological Society of China*, Vol. 43, No. 3, pp. 521-534.
- Szakacs, M., 1994, Redefining active volcanoes: a discussion, *Bull Volcano*, Vol. 56, pp. 321-325.
- Tanaka, H. L., K.Yamamoto, 2002, Numerical simulation of volcanic plume dispersal from Usu volcano in Japan on 31 March 2000 using PUFF model, *Earth Planets Space*, Vol. 54, pp. 743–752.
- Tupper, A., S. Carn, J. Davey, Y. Kamada, R. Potts, 2004, An Evaluation of Volcanic Cloud Detection Techniques during Rescent Significant Eruptions in the Western ‘Ring of Fire’ , *Remote Sensing of Environment*, Vol. 91, pp. 27-46.
- Wang, K. L., S. L. Chung, C. H. Chen, R. Shinjo, Yang, T. F., C.-H. Chen, 1999, Post-collisional magmatism around north Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough, *Tectonology*, Vol. 308, pp. 363-376.
- Wiesner, M. G., Wetzel, A., Catane, S. G., Listanco, E. L., Mirabueno, H. T., 2004, Grain size, areal thickness distribution and controls on sedimentation of the 1991 Mount Pinatubo tephra layer in the South China Sea, *Bull Volcano*, vol 67, Number 5, pp 226-242.
- Zimanowski, B., K. Wohletz, P. Dellino, R. Buttner, 2003, *The Volcanic Ash Problem*, *J. of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 122, pp. 1-5.

Numerical Simulation of Volcanic Ash Dispersal and Fallout from Datun Volcano and Kuei-Shan-Tao by using PUFF Model

Cheng-Chung Wu¹ Che-Sheng Cheng² Meng-Yang Lee³ Chi-Cherng Hong³

¹Chinese Naval Meteorology and Oceanology Office

²Armed Forces Weather Center, MND

³Taipei Municipal University of Education

ABSTRACT

Taiwan is located in the Pacific Ring of Fire. Many of the volcanoes in Taiwan's neighboring areas such as the Philippine Arc and Ryukyu Arc are currently still active. Although Tatun volcano and Kuei-Shan-Tao have no historical record of eruption events, many scholars believe they should belong in the category of active volcanoes.

Numerical model could provide information about dispersion of the volcanic ash and settlement distribution. These could be very important for issuance of disaster advisories and risk assessments. From the perspective of disaster prevention, the monitoring and numerical simulation of volcanoes in Taiwan and neighboring areas is necessary.

We use the PUFF model to simulate volcanic ash dispersion by different seasons and different eruption heights and to predict the characteristics of ash fallout and the ash distribution aloft.

Key words: PUFF model, volcanic ash, Tatun volcano, Kuei-Shan-Tao.