

南台灣山岳波之研究 The Study of the Mountain Wave on Southern Taiwan

宋偉國

¹ 空軍航空技術學院一般學科部軍事氣象系

¹Soong Wei-Kuo

¹Department of Military Meteorology, Airforce Institute of Technology

摘要

本文運用WRF模式模擬南台灣山岳波特性，並透過2013年12月8日東北季風個案模擬，研討南台灣氣流與地形相關性。模擬分為二種情形，第一種為二維理想個案模擬，山脈高度設為1000m，浮力頻率 $N=0.01$ 穩定大氣，測試西風與東風狀態下，南台灣氣流分布情況。當福祿數 $Fr=1$ 、 1.5 時，無論西風或東風，均有中對流層產生臨界層，並使低層產生下坡風暴情況。當 $Fr=2$ 時，此時氣流動能很強，直接越過山脈，動能上傳後，並無臨界層的產生。第二種為實際個案模擬結果，初始場為東北季風型態下，氣流遇到山脈時，由於地形高約2000公尺，氣流風速僅約 10m/s ， $F=0.5$ ，氣流無法越過山脈，形成繞山而過情形，而無法產生臨界層與下坡風暴情況，顯示東北季風南下台灣時，初始風速若未能達到 20m/s 以上，則不容易形成落山風情況。然而，過去研究顯示，南台灣出現落山風時，其環境風速並未出現 20m/s 情況，顯示落山風應有其他機制，此將於未來研究中作更深入探討。

關鍵字：山岳波、下坡風暴、福祿數

Abstract

We use WRF model to simulate the mountain wave on southern Taiwan. There are four experiments to be test on idealize situation which is 2 dimension flow and no PBL and cumulus convection . The first to third experiment is under the westerly flow and the Froude number equal 1, 1.5, 2. The fourth test is that the mean flow is easterly and the Froude number is equal 1. The results showed that under $Fr=1$ and 1.5 , there is down slope wind associated with strong wind speed which is produced by mountain wave transported momentum upward and reflected to ground as the wave was block the critical level. There is no difference between westerly and easterly when the Fr equal 1 or 1.5. As the Fr increases to 2, the critical layer disappeared and the flow moved over the mountain. We also simulated real case at 8 Dec 2013 which was a northeasterly on southern Taiwan. The wind speed is 10m/s and under stable environment. The mountain wave is not occurred because the Fr equal 0.5. The flow passed around the Central Mountain. However, even the strong wind speed occurred at ground closed to mountain over southern Taiwan, the speed of mean flow is not strong enough to over 1 of the Fr . It means the mechanism of strong down slope wind should be studied further.

Key word : mountain wave, down-slope wind, Froude number

一、前言

南台灣西臨台灣海峽，兼之位於中央山脈末段，季風南下至此，平均環流與地形、海陸交界造成局部環流特性相當複雜(宋等，2001、2004、2005)，且冬季于恆春半島亦常出現落山風情形(洪與胡，1990)，氣流與山脈的關係、對人文影響均值得更深研究。氣流遇到地形時，可能被阻擋或越山而過，在山區附近的氣流與大氣穩定度、山脈高度形成複雜的氣流行為，南台灣地區位於中央山脈末段，季風遇到中央山脈的情況，對於對流的產生位置、強度、強風帶(如落山風)等等現象，甚至對高雄地區空氣污染情況都有顯著影響，本文目的即在研究南台灣氣流受地形影響產生的特性。

氣流受地形影響可能在迎風面形成停滯點，造成上游地區的氣流輻合，進而激發對流系統發生。另一方面，氣流受地形摩擦力的黏滯作用，透過慣性力/黏滯力(=雷諾數 Reynolds number; Re)的值，可以分析氣流呈現層流或紊流情況，當 Re 大於 47 及小於 100000 時，氣流將在山背後產生馮卡門渦街(Von Karman vortex street)，即背風區可能產生氣旋與反氣旋相互交替現象。如果氣流慣性力很強，足以越過山脈時，則視山脈形狀與大氣穩定度，可能發生駐波、陷入波或下坡風暴。另一種情況，是大氣穩定情況下，由於存在顯著垂直風切，當風切效應強過浮力效應時，則可能產生 Kelvin-Helmholtz 不穩定度而形成莢狀雲。

以孤立山脈為例，山脈半山高之寬度 a 與平均風 u 、穩定度 N 關係，形成三種情況(圖 1)：(a) $a \ll u/N$ (b) $a = u/N$ (c) $a \gg u/N$ ：

$$h(x) = \frac{h_M a^2}{a^2 + x^2}$$

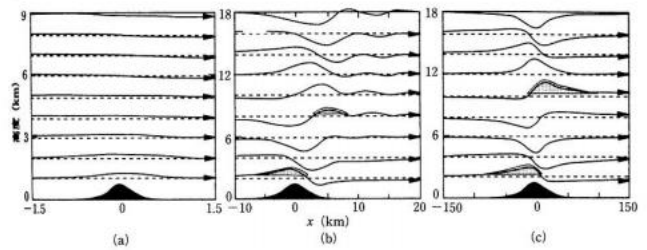


圖 1 氣流過山不同情況之氣流分布圖(摘自 Durran, 1986)

氣流過山的理論方程式如下所示：

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) u' + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p'}{\partial x} = 0$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) w' + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\theta'}{\bar{\theta}} g = 0,$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0,$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) \theta' + w' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = 0$$

由第一式對 z 微分，減去第二式對 x 微分，消去 p' ，得到下式方程式：

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial z} \right) - \frac{g}{\bar{\theta}} \frac{\partial \theta'}{\partial x} = 0$$

再由第三式與第四式，消去上式的 u' 、 θ' ，得到下式：

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 w'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial z^2} \right) + N^2 \frac{\partial^2 w'}{\partial x^2} = 0$$

若考慮為駐波，則方程式簡化為下式：

$$\left(\frac{\partial^2 w'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial z^2} \right) + \frac{N^2}{\bar{u}^2} w' = 0$$

令解

$$w'(x, z) = \tilde{w} \exp[i(kx + mz)]$$

代入控制方程式，當 m 值要為實數，才有波動解，則

$$m^2 = \frac{N^2}{\bar{u}^2} - k^2$$

N 越大(越穩定)、 $\bar{u}$ 越小(平均風越小)、 k 越小(山脈越寬)時，越有波動解，能量可以上傳。若考慮 $\bar{u}$ 與 N 有垂直變化，則

$$\frac{d^2}{dz^2} \hat{w} + (l^2 - k^2) \hat{w} = 0$$

$$l^2 = \frac{N^2}{(\bar{u} - c)^2} - \frac{1}{\bar{u} - c} \frac{d^2 \bar{u}}{dz^2}$$

l^2 要大於 0，能量才能上傳， l^2 小於 0，則波動隨高度衰減。如果下層大氣 l^2 較大，允許較多波數段的波動上傳，但上層 l^2 較小的值，只能允許較少波數段波動上傳，造成部分波數段被反射回來，在界面與地表間不斷反射並向下游傳播，形成陷入波。

若平均風 $\bar{u}$ 隨高度快速增加，或低層存在一穩定層，使 N 隨高度快速減少，則 l^2 小於 0，低層能量上傳，卻在某層高度衰減後，被高層反射，甚至當平均風接近於波速 c 時的臨界層，將導致 l^2 趨近於無窮大，導致下坡風暴的產生。Klemp 與 Lilly(1975)提出共振說，對流層頂之上為穩定的平流層，會反射山岳造成的內重力波，如果對流層頂的高度恰為對流層內重力波垂直波長的一半時，反射波與入射波因相位相同而產生共振，造成強烈的下坡風暴。

Bretherton(1966)、Booker & Bretherton(1967)證明當臨界層附近的理查遜數(Ri)大於 1/4 時，內重力波無法穿越臨界層，波的振幅會以指數函數形式強烈地迅速衰減，Ri 值愈大，衰減

愈快，所消失的動能量與能量都被臨界層吸收。洪與胡(1990)、洪等(1990)、洪與翁(1985)、翁富山(1986)研究恆春落山風，當地面有強風、臨界層附近的 Ri 接近於 1/4 但仍大於 1/4、有適當的臨界層高度時，部分波動的反射，可能導致共振增幅，擾動隨時間增強，產生落山風。

台灣南部冬季東北季風南下至南台灣時，受地形效應影響下，天氣型態常與北台灣顯著差異，南北溫差可達十幾度以上，且南部局部風場效應顯著，一方面固然有海風影響，另一方面，東北氣流遇到山脈後，山岳波的特性值得探討，本研究目的即透過 WRF 模式模擬東北季風下，探討南台灣山岳波之特性。

二、WRF 模式與實驗設計

本文使用 WRF 中尺度模式，分成二階段測試氣流過山情形，第一部分為理想二維模式，地形高度設為 1000m，穩定度指標浮力頻率 $N=0.01$ ，初始風場分別使用 $U=10$ m/s、 15 m/s、 20 m/s、以及東風 $u=-10$ m/s 四個個案情況下，模擬氣流過山情形，該理想狀態並不考慮積雲參數化，亦無邊界層參數化，故亦無考量長波輻射與短波輻射情形，單純只考量不同的風場，遇到地形阻擋下，氣流的分布情況。

模式第二部份則以 2013 年 12 月 8 日東北季風南下台灣之實際個案模擬，模式使用三層模式，水平網格點解析度由大到小為 27、9、3 公里，模式物理項降水方面採用 KM 2D Smagor 模組，不考慮積雲變化。邊界層採用 YSU 模組，短波輻射採用 Dudhia，長波採用 RTIM，模擬 24 小時。

三、理想二維模擬分析

個案一：當風向初始值設為西風 10 m/s 時(福祿數 Froude number; $Fr=1$) (圖 2)，氣流遇到山高 1000 m 的孤立山峰時，模擬 3 小時結果顯示，強風區超過 24m/s 以上有二處，分別位於高度 3km 以下的山脈背風處以及 7km 以上接近對流層頂，且於 4-5 公里高度出現風速為零的臨界層，另外，風速帶也呈現隨高度往西傾斜，顯示西風遇山脈過山且產生波動現象，此時動量上傳，在中對流層高度產生臨界層後，能量下傳造成低層強風的出現。模式模擬 12 小時後，臨界層往下游移動，低層強風持續增強至 26m/s 以上，並往下

游延伸到 100 公里左右。

個案二：當初始風速增強為 15m/s 時，此時 $Fr=1.5$ (圖 3)，模擬 3 小時後，中對流層尚未出現臨界層，風速出現 20m/s 以上的強風區由背風坡隨高度往西傾斜至 5-6 公里高度，另一強風區出現在低層強風區東側，顯示能量持續隨高度往東傳送。模擬 12 小時後，開始在中對流層產生臨界層，低層強風速帶亦往下游延伸中。

個案三：當風速到達 20 m/s 後($Fr=2$)，模擬 3 小時與 12 小時結果均顯示並無出現臨界層(圖 4)，氣流單純越山而過後，產生波動並將動量往上传遞。

個案四：初始風場改為東風-10m/s 情況，(圖 5)模擬 3 小時後，在高度 4 公里處出現臨界層，但近地層並無出現局部強風速帶，模擬 12 小時後，臨界層往下游延伸，高度亦下降至 2-3 公里，但仍無強風速區域產生。

四、個案五：實際個案模擬

102年12月9日天氣圖顯示(圖6a)，冷鋒已在台灣北側，高雄地區早上為北風，多雲有霾情況，上午八點溫度為23°C，相對溼度約73%，隨著日出溫度逐漸上升，中午達28.6°C，風向在北風與北北西風之間，相對溼度約60%左右，顯示為比較偏乾燥天氣。

南台灣地面此時仍為東北風情況(圖6b)，沿著Y軸網格點28處取東西向垂直剖面(圖6c)，800hPa以下均為東風氣流，山脈迎風面有上升運動，在綠島地區地面風速約為10m/s之東北風(圖6d)，700hPa以下大氣很潮濕，近地面降溫率接近乾絕熱降溫率，900hPa-700hPa近乎溼絕熱降溫率，顯示近地層900hPa以下大氣為中性大氣，900-700hPa則近乎穩定大氣。模式模擬12小時後(圖7a)，地面風仍為東北風，剖面圖顯示台灣東側外海出現較為明顯上升運動(圖7b)，綠島探空顯示850hPa至600hPa出現吸南氣流(圖7c)，相對地面東北風而言，顯示有顯著垂直風切。東西向風場垂直剖面顯示(圖8)，2公里以下均為東風帶，風速最大值在外海地區約10m/s左右，並無出現強下坡風情況，而山脈附近風速近乎為零，出現停滯點，2.5公里以上則大氣均為顯著西風帶。近地層出現模式模擬18小時後(圖8d)，低層靜風區延伸到離山脈100公里處，此時亦無出現低層強風區以及波動情況。

本個案初始溫度與位溫垂直剖面顯示，南台灣本島降溫率約5°C/km(圖9a, b)，顯示為穩定大

氣。模擬12小時後(圖9c, d)，台灣東側本島則降溫率仍為5°C/km的穩定大氣，而山脈西側則山坡出現局部高溫，地面至山坡產生逆溫之穩定大氣，山坡至900hPa仍為穩定大氣。

南台灣東側初始大氣環境為穩定大氣，模擬一段時間後，此時南台灣本島仍為穩定大氣，風場仍為東風，風速約10m/s，而800hPa以上雖有西風，使大氣出現垂直風切，唯此臨界層並無產生下坡風暴情況，對照恆春地面風速，亦無出現落山風情況，此可能是山脈高度為2000m，地面至1500公尺位溫差距10°C情況下，近地層位溫平均約290度K， $N^2=(10/290)*(10/1500)=2.29*10^{-4}$ ，即N接近0.01下， $Fr=U/NH=10/(0.01*2000)=0.5$ ，氣流無能力越過山脈，因而產生繞山情形，並無下坡風暴個案發生。

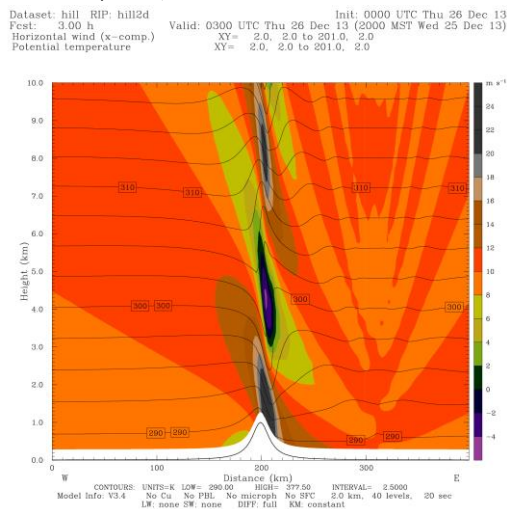


圖2a 個案一：u=10m/s時，模擬3小時的東西向風速分布。

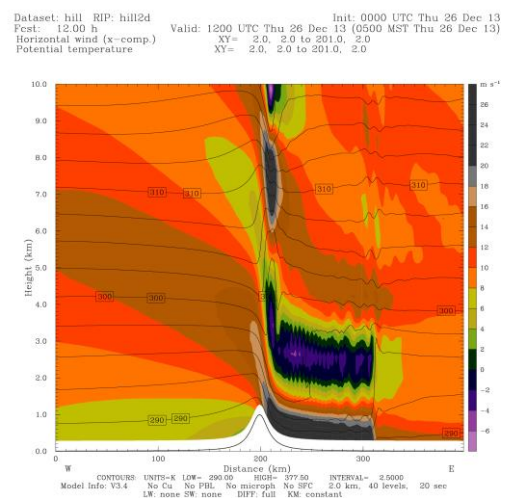


圖2b 個案一：u=10m/s時，模擬12小時的東西向風速分布。

Dataset: hill5 RIP: hill2d
Fest: 3.00 h Valid: 0300 UTC Thu 26 Dec 13 (2000 MST Wed 25 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0
Potential temperature XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

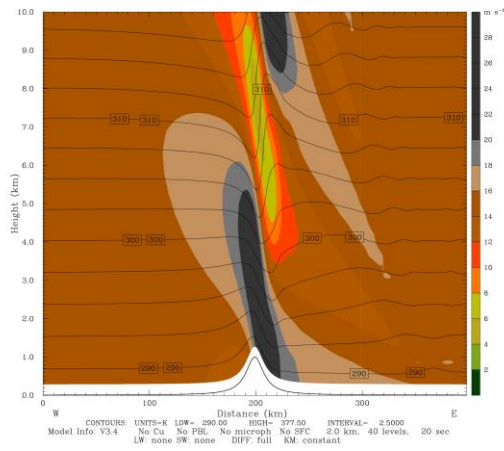


圖3a 個案二：u=15m/s時，模擬3小時的東西向風速分布。

Dataset: hill5 RIP: hill2d
Fest: 12.00 h Valid: 1200 UTC Thu 26 Dec 13 (0500 MST Thu 26 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0
Potential temperature XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

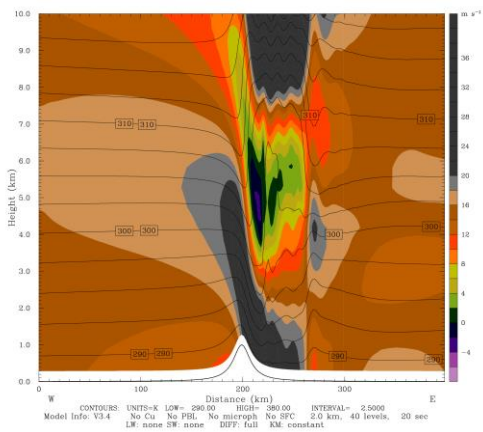


圖3b 個案二：u=15m/s時，模擬12小時的東西向風速分布。

Dataset: hill2 RIP: hill2d
Fest: 3.00 h Valid: 0300 UTC Thu 26 Dec 13 (2000 MST Wed 25 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0
Potential temperature XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

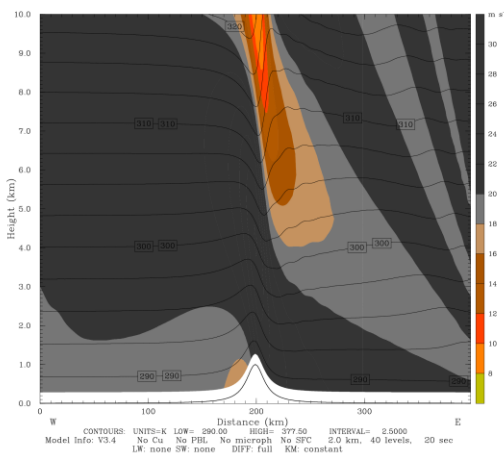


圖4a 個案三：u=20m/s時，模擬3小時的東西向風速分布。

Dataset: hill2 RIP: hill2d
Fest: 12.00 h Valid: 1200 UTC Thu 26 Dec 13 (0500 MST Thu 26 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0
Potential temperature XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

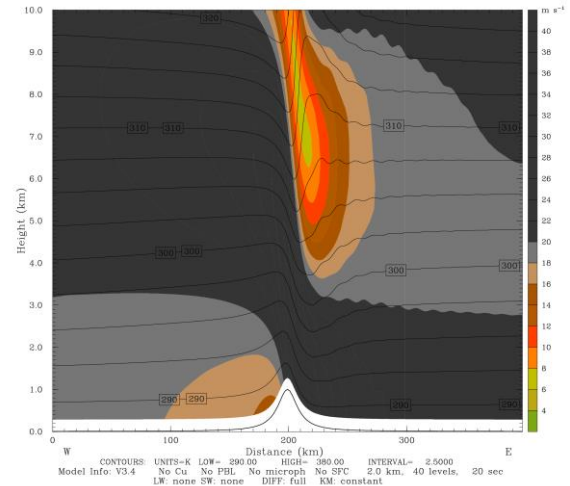


圖4b 個案三：u=20m/s時，模擬12小時的東西向風速分布。

Dataset: hill e RIP: hill2de
Fest: 3.00 h Valid: 0300 UTC Thu 26 Dec 13 (2000 MST Wed 25 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0
Potential temperature XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

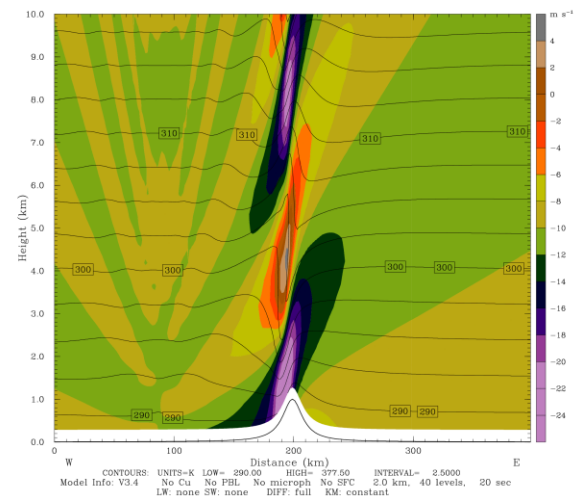


圖5a 個案四：u=-10m/s時，模擬3小時的東西向風速分布。

Dataset: hill e RIP: hill2de
Fest: 12.00 h Valid: 1200 UTC Thu 26 Dec 13 Init: 0000 UTC Thu 26 Dec 13
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0
Potential temperature XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

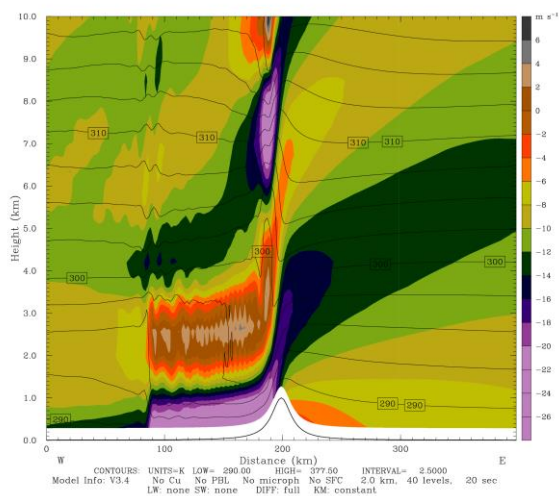


圖5b 個案四：u=-10m/s時，模擬12小時的東西向風速分布。

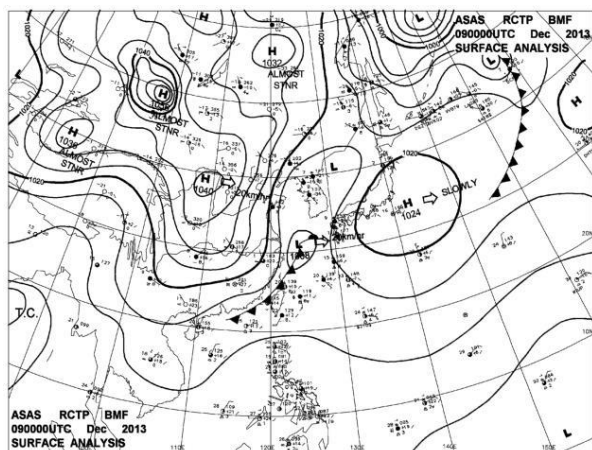


圖 6a 102 年 12 月 9 日 0000UTC 天氣圖

Dataset: real RIP: rip1208
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Sun 08 Dec 13 Init: 0000 UTC Sun 08 Dec 13
Temperature at k-index = 27
Sea-level pressure at k-index = 27
Horizontal wind streamlines

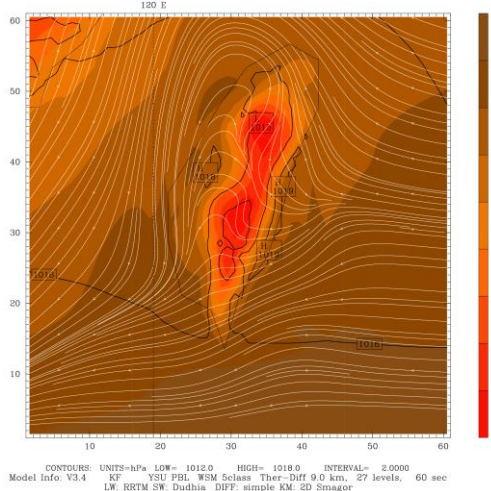


圖 6b 2013 年 12 月 8 日 0000UTC 地面氣流線分布。

Dataset: real RIP: rip1208
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Sun 08 Dec 13 Init: 0000 UTC Sun 08 Dec 13
Circulation vectors XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0

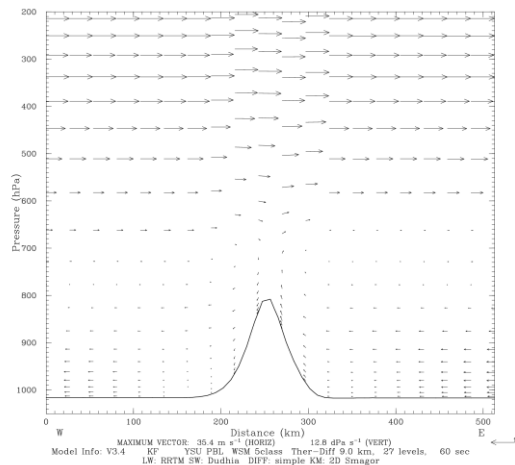


圖6c 2013年12月8日0000UTC南台灣(Y=28)U、W垂直剖面分布。

Dataset: real RIP: rip1208
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Sun 08 Dec 13 Init: 0000 UTC Sun 08 Dec 13
Temperature x,y= 36.76, 22.34 lat,lon= 22.67, 121.46 stn=RCGL46786
Dewpoint temperature x,y= 36.76, 22.34 lat,lon= 22.67, 121.46 stn=RCGL46786
Horizontal wind vectors x,y= 36.76, 22.34 lat,lon= 22.67, 121.46 stn=RCGL46786

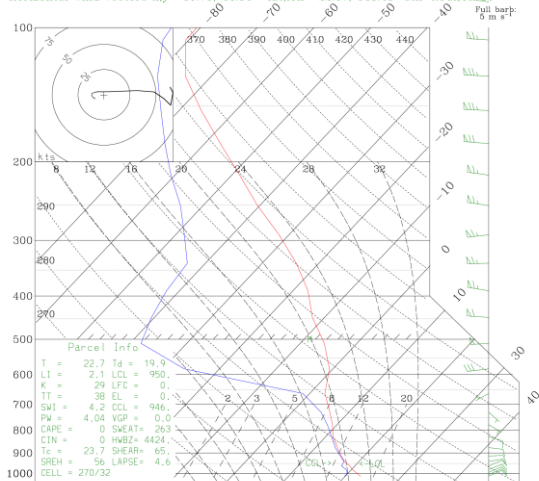


圖6d 2013年12月8日0000UTC綠島探空分布。

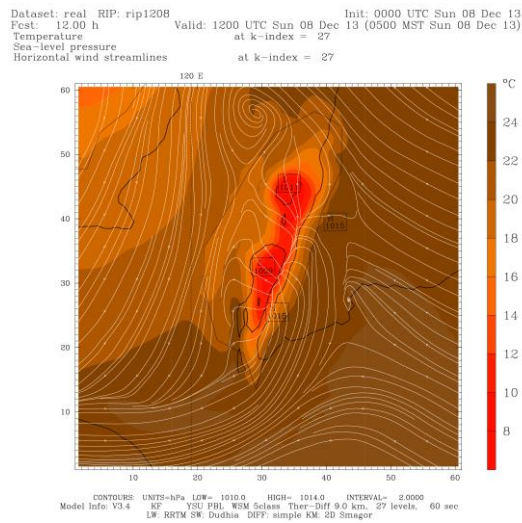


圖7a WRF模擬12小時2013年12月8日1200UTC地面氣流線分布。

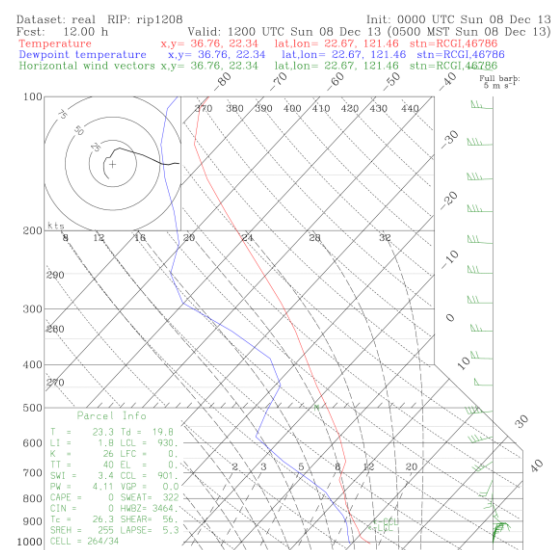


圖7c WRF模擬12小時2013年12月8日1200UTC綠島探空分布。

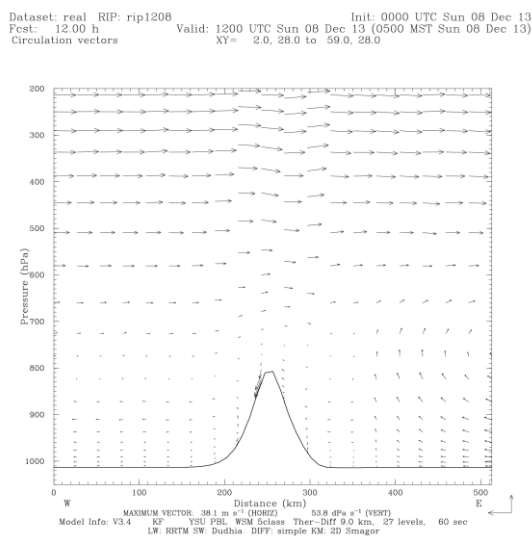


圖7b WRF模擬12小時2013年12月8日0000UTC南台灣(Y=28)U、W垂直剖面分布。

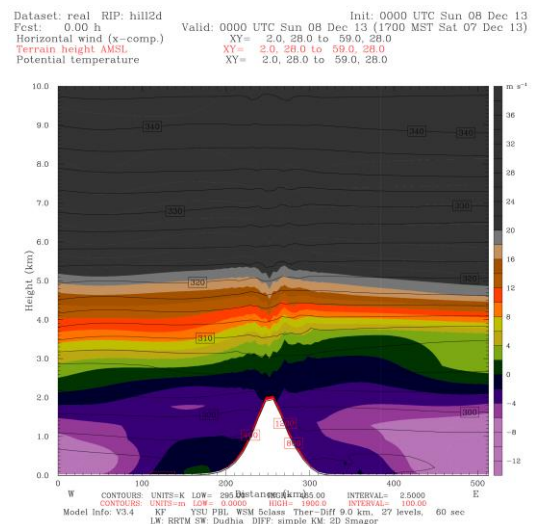


圖8a WRF初始2013年12月8日0000UTC南台灣(Y=28)東西向風速垂直剖面分布。

Dataset: real RIP: hill2d
Fcst: 6.00 h Valid: 0600 UTC Sun 08 Dec 13 (2300 MST Sat 07 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0
Terrain height AMSL XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0
Potential temperature XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0

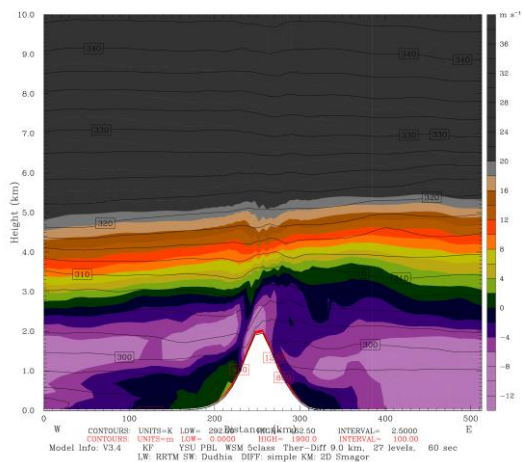


圖8b WRF 模擬6小時WRF初始2013年12月8日0600UTC南台灣(Y=28)東西向風速垂直剖面分布。

Dataset: real RIP: hill2d
Fcst: 12.00 h Valid: 1200 UTC Sun 08 Dec 13 (0500 MST Sun 08 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0
Terrain height AMSL XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0
Potential temperature XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0

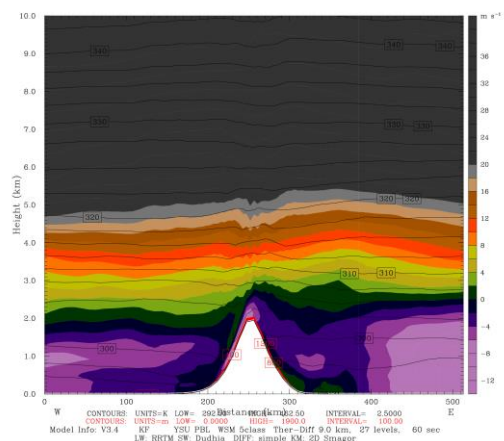


圖8c WRF 模擬12小時WRF初始2013年12月8日1200UTC南台灣(Y=28)東西向風速垂直剖面分布。

Dataset: real RIP: hill2d
Fcst: 18.00 h Valid: 1800 UTC Sun 08 Dec 13 (1100 MST Sun 08 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0
Terrain height AMSL XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0
Potential temperature XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0

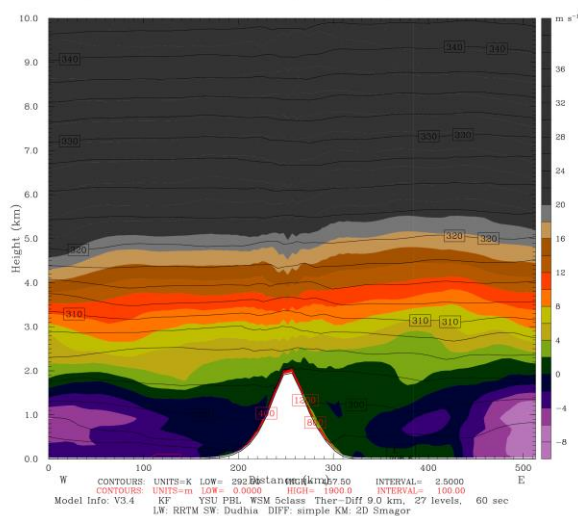


圖8d WRF 模擬18小時2013年12月8日1800UTC南台灣(Y=28)東西向風速垂直剖面分布。

Dataset: real RIP: hill2d
Fcst: 0.00 h Valid: 0000 UTC Sun 08 Dec 13 (1700 MST Sat 07 Dec 13)
Temperature XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0

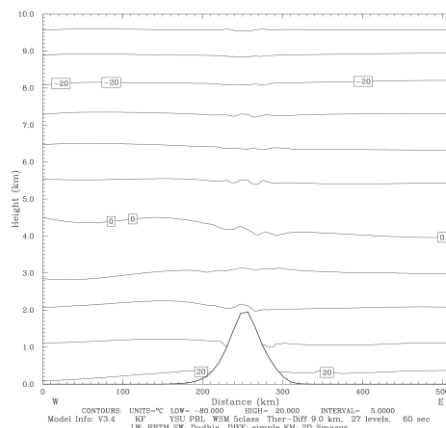


圖9a WRF 模擬初始2013年12月8日0000UTC南台灣(Y=28)東西向溫度垂直剖面分布。

Dataset: real RIP: hill2d Init: 0000 UTC Sun 08 Dec 13
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Sun 08 Dec 13 (1700 MST Sat 07 Dec 13)
Potential temperature XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0

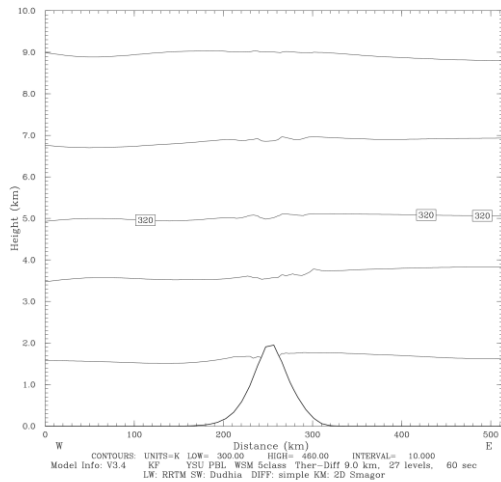


圖9b WRF模擬初始2013年12月8日0000UTC南台灣(Y=28)東西向位溫度垂直剖面分布。

Dataset: real RIP: hill2d Init: 0000 UTC Sun 08 Dec 13
Fest: 12.00 h Valid: 1200 UTC Sun 08 Dec 13 (0500 MST Sun 08 Dec 13)
Potential temperature XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0

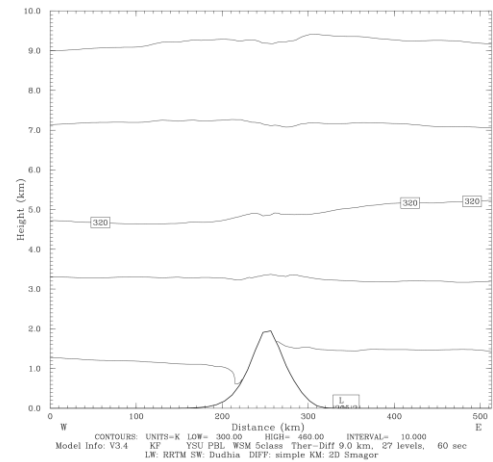


圖9d WRF模擬12小時2013年12月8日1200UTC南台灣(Y=28)東西向位溫垂直剖面分布。

Dataset: real RIP: hill2d Init: 0000 UTC Sun 08 Dec 13
Fest: 12.00 h Valid: 1200 UTC Sun 08 Dec 13 (0500 MST Sun 08 Dec 13)
Temperature XY= 2.0, 28.0 to 59.0, 28.0

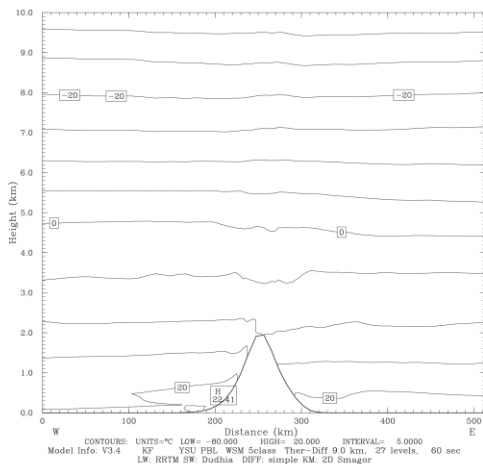


圖9c WRF模擬12小時2013年12月8日1200UTC南台灣(Y=28)東西向溫度垂直剖面分布。

表1 恆春2013年12月9日溫度、溼度與風場

觀測時間	溫度 °C	風向	風力 m/s 級	相對溼度 %
12/08 15:00	23.8	北北東	4.5 3	70
12/08 14:45	23.2	東北	2.6 2	72
12/08 14:30	22.5	東北	2.5 2	81
12/08 14:15	22.6	東	2.4 2	79
12/08 14:00	23.1	東	1.0 1	80
12/08 13:45	23.2	北北東	3.1 2	77
12/08 13:30	23.1	東北	2.7 2	77
12/08 13:15	23.0	北北東	2.8 2	79
12/08 13:00	23.3	北北東	4.5 3	76
12/08 12:45	23.8	北	3.8 3	73
12/08 12:30	24.2	北	4.9 3	70

五、結論

本文運用WRF模式模擬南台灣山岳波特性，並透過2013年12月8日東北季風個案模擬，研討南台灣氣流與地形相關性。模擬分為二種情形，第一種為二維理想個案模擬，山脈高度設為1000m，浮力頻率 $N=0.01$ 穩定大氣，測試西風與東風狀態下，南台灣氣流分布情

況。當福祿數 $Fr=1$ 、 1.5 時，無論西風或東風，均有中對流層產生臨界層，並使低層產生下坡風暴情況。當 $Fr=2$ 時，此時氣流動能很強，直接越過山脈，動能上傳後，並無臨界層的產生。

第二種為實際個案模擬結果，初始場為東北季風型態下，氣流遇到山脈時，由於地形高約2000公尺，氣流風速僅約10m/s， $F=0.5$ ，氣流無法越過山脈，形成繞山而過情形，而無法產生臨界層與下坡風暴情況，顯示東北季風南下台灣時，初始風速若未能達到20m/s以上，則不容易形成落山風情況。然而，過去研究顯示，南台灣出現落山風時，其環境風速並未出現20m/s情況，顯示落山風應有其他機制，此將於未來研究中作更深入探討。

參考文獻

1. 洪秀雄、胡仲英，1990：恆春落山風之分析研究 一、現象分析，大氣科學，18，3，171-190。
2. 洪秀雄、胡仲英、王時鼎，1990：山岳造成之中尺度天氣現象：一、恆春落山風，氣象科技研究中心技術報告彙編》，3，2，265-305。
3. 洪秀雄、翁富山，1985：恆春半島氣流過山引起之擾動，國立中央大學大氣物理研究所大氣動力研究報告第750528號，82頁。
4. 翁富山，1986：恆春半島氣流過山引起之擾動，桃園：國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
5. 宋偉國、馬屏龍、羅國誠、周文信、顏富山、郭政泰、馮信瑋，2005：南部區域天候模擬分析，空軍航空技術學院學報，第四卷，第一期，157-165。
6. 宋偉國、巫美儀、李精進、陳益盛、陳建達，2004：南部地區地形與邊界層結構對局部環流結構之模擬，第八屆全國大氣科學學術研討會論文彙編，桃園，57-64。
7. 宋偉國、張凱軍、張鈺雪，2001：高屏地區局部環流之數值模擬研究，第七屆全國大氣科學研討會論文彙編，國立台灣大學，92-97頁。
8. Durran, D.R., 1986: Another look at downslope windstorms. Part I: On the development of analogs to supercritical flow in an infinitely deep continuously stratified. J. Atmos. Sci., 93, 2527-2543.
9. Klemp, J.B., and D. K. Lilly, 1975: The dynamics of wave-induced downslope winds. J. A. S., 32, 320-339.
10. Bretherton, F. P. 1966: The propagation of groups of internal gravity waves in a shear flow. Q. J. R. Meteorol. Soc., 92, 466
11. Booker, J. R., & Bretherton, F. P. 1967, The critical level for internal gravity waves in a shear flow. J. Fluid Mech., 27, 513