

TAMEX IOP2

探空資料的模式校驗與客觀分析

許武榮

國立台灣大學大氣科學系

摘 要

梅雨鋒面上的主要特徵雖然是中小尺度天氣系統，但鋒面的發生主要是大陸冷高壓與太平洋暖氣團之間相互制衡的結果，本研究以美國國家氣象中心數值模式分析場為初始條件，模擬了1987年5月14日到15日的24小時內實際大氣狀況。由於美國國家氣象中心分析場僅能解析綜觀尺度天氣系統，我們希望在數值研究中以大尺度天氣系統透過較高解析度模式和複雜的地形及海陸分佈模擬中尺度運動的發生，並研究梅雨鋒面所伴隨低層噴流的發展機制。

模擬結果顯示，較大尺度的大氣運動與美國國家氣象中心的分析大致上相當符合，高壓與槽線的移動及低層噴流的發展都可以由沒有摩擦力的簡化模式得到理想的結果，許多由真實地形（解析度是75公里）所引發的小尺度擾動則無法由美國國家氣象中心資料得到證實，由垂直速度的分佈，我們可推測這些擾動對局部區域的天氣有相當大的影響。

一、前 言

梅雨鋒面是發生於東亞地區的半滯留性鋒面系統，其發生的時間是在東北季風漸漸減弱，西南季風漸漸增強的交替季節，每年約在五月時首先出現於中國華南區域，對台灣的影響約為五月中到六月中，然後自六月中到七月中梅雨系統北移至華中及日本一帶，梅雨鋒面往往可延伸數千公里，可是其寬度（cross-front scale）卻小於300公里，此外梅雨鋒面（雲帶）實際上是由許多中小尺度系統所組成（Matsumoto et al., 1971; Ninomiya and Akiyama, 1971, 1972; Akiyama 1973a, 1973b, 1973c），其中最顯著的系統是鋒面帶南邊（暖區）的組織性中尺度對流系統（

organized mesoscale convective system (MCS)），這些對流系統水平尺度約為150到200 Km，地面氣壓擾動約為0.7mb (Matsumoto and Akiyama, 1969) 由西向東移動，當它們經過台灣海峽遇到中央山脈時往往因地形而產生大量降水。

由以上的敘述，梅雨是包含了許多大小不同尺度運動的複雜天氣現象，對台灣地區相當重要，如果能充份了解梅雨，則日後可作為預報參考，減少災害損失，台灣區中尺度實驗（Taiwan Area Mesoscale Experiment (TAMEX)）即是在這個目標下對梅雨系統於1987年五月、六月進行觀測，本研究主要是針對TAMEX the second Intense Observation Period (IOP 2) (

5月14日到5月16日)的梅雨系統進行數值模擬研究。

梅雨鋒面上的主要特徵雖然是中小尺度天氣系統，但鋒面的發生主要是大陸冷高壓與太平洋暖氣團之間相互制衡的結果，本研究以美國國家氣象中心(National Meteorological Center (NMC))數值模式分析場為初始條件，由於NMC分析場僅能解析綜觀尺度天氣系統，我們希望在數值研究中以大尺度天氣系統透過較高解析度模式和複雜的地形及海陸分佈模擬中尺度運動的發生，並研究梅雨鋒面所伴隨低層噴流的發展機制。

二、數值模式

本研究沿用美國普渡大學中尺度數值模式(Sun and Hsu, 1988)。該模式為一原始方程模式(primitive equation model)，科氏力，水汽的蒸發與凝結，模式中加以計算。垂直使用 σ 座標， σ 定義為 $(p-p_t)/(p_s-p_t)$ ，其中 p_t 為模式頂氣壓。 p_s 為式底層氣壓。在本研究中，摩擦項目並未考慮(inviscid)。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{Adv}(u) + f v - \frac{1}{p_*} \left[\frac{\partial(\phi p_*)}{\partial x} - \frac{\partial(\phi \sigma)}{\partial \sigma} \frac{\partial p_*}{\partial x} \right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \text{Adv}(v) - f u - \frac{1}{p_*} \left[\frac{\partial(\phi p_*)}{\partial y} - \frac{\partial(\phi \sigma)}{\partial \sigma} \frac{\partial p_*}{\partial y} \right]$$

$$\text{其中 } \text{Adv}(\) = -u \frac{\partial(\)}{\partial x} - v \frac{\partial(\)}{\partial y} - \dot{\sigma} \frac{\partial(\)}{\partial \sigma}$$

$$\frac{\partial \theta_e}{\partial t} = \text{Adv}(\theta_e)$$

$$\partial \phi / \partial (\ln p) = -R_d T (1 + 0.61q - q_t),$$

$$\frac{\partial q_w}{\partial t} = \text{Adv}(q_w)$$

$$\frac{\partial p_*}{\partial t} = - \int_0^1 \nabla_{\sigma} \cdot (p_* \vec{v}) d\sigma,$$

$$\nabla_{\sigma} \cdot (p_* \vec{v}) = \frac{\partial(u p_*)}{\partial x} + \frac{\partial(v p_*)}{\partial y}$$

$$\dot{\sigma} = - \frac{1}{p_*} \int_0^{\sigma} \nabla_{\sigma} \cdot (p_* \vec{v}) d\sigma + \frac{\sigma}{p_*} \int_0^1 \nabla_{\sigma} \cdot (p_* \vec{v}) d\sigma,$$

$$\nabla_{\sigma} \cdot (p_* \vec{v}),$$

$$p_* = p_s - p_t,$$

$$\theta_e = \theta + (\ell_v / c_p) (\theta / T) q,$$

$$\phi = g z,$$

u : x 方向之風速

v : y 方向之風速

$\dot{\sigma}$: 垂直運動

f : 科氏參數

p : 氣壓

ϕ : 重力位

θ_e : 相當位溫

q_w : 總水量(含水汽與液態水)

q_t : 液態水水量

q : 比濕

ℓ_v : 凝結潛熱

C_p : 定壓比熱

C_v : 定容比熱

p_* : $p_s - p_t$

g : 重力加速度

z : 高度

R_d : 乾空氣氣體常數

三、進行模擬所使用的條件

1 模式區間及背景資料的建立

模式的計算區間是以東經 120° 北緯 25° (約台灣西北近海) 為中心的 2700 公里 × 2700 公里的四方區間，西邊包括了青康藏高原的東南角南邊伸展至菲律賓與中南半島，垂直伸展至 100 mb，網格間距約為 75 公里 × 75 公里 × 300 公尺，中高對流層的垂直解析度較低約為 1 公里，地

形資料是以北半球高解析度(10分)資料客觀分析至網格點上,並作勻滑(smoothing)處理,青康藏高原一角高度仍超過3000公尺,武夷山800公尺,台灣中央山脈最高約1,500公尺。

2. 初始條件

將1987年5月14日NMC模式分析場以Barnes客觀分析法(Maddox, 1980)內插至網格點上,但僅使用於高度、水平風場,而溫度場是直接由內插所得的高度場計算求得。

3. 側邊界條件

使用Davis Scheme(Davis 1976, 1983)要求側邊界趨向於NMC分析場(接近於觀測值),設定緩和方程式(relaxation equation)於側邊界上的5點區間(5-point band)緩和係數在此區間內愈靠近模式中心愈小。

4. 上下邊界條件

為了使低層所激發的重力波順利向上傳遞,模式最上面5層加上了Newtonian cooling type的緩和項目,低層假設沒有摩擦作用。

四、模擬個案天氣概述

模擬時間為1987年5月14日00Z到15日00Z。14日00Z地面天氣圖(圖1)顯示一大陸性冷高壓位於華中華南一帶,低壓位於日本南方海面冷鋒自低壓中心向西南延伸經過台灣及廣東外海,華中、華南沿海一帶東北風很強氣溫比鋒面以南低4~8°C,溫度梯度相當大,鋒面雲層(圖2)顯示鋒面的位置,大陸性冷高壓在850mb天氣圖(圖3)上並不顯著,鋒面帶(溫度梯度高的區域)也明顯地較地面鋒面偏北,700mb(圖4)為西風,沿海地區由低層東北風轉為高層西風的天氣型態類似於冬季典型寒潮,但是強度較弱。24小時以後,高壓出海(圖5),台灣附近風向轉為東北東風及東南風,低壓槽迅速向東移動850mb(圖6)華南一帶西南風增強達10~20m/sec,700mb(圖7)

亦有同樣情形發生。此時雖有很強的低層噴流但是噴流剛開始發展,並沒有伴隨降水系統產生(圖8a),往後的36小時內,噴流一直保持著一定強度並向東移,由於西南氣流帶來充沛水汽在華南一帶輻合,在廣州(圖8b)及台灣(圖8c)產生大量降雨,TAMEX 10P2即是對圖8c上的飆線(squall line)進行觀測。

五、模擬結果與討論

1. 溫度場

模擬的結果主要在三個等高面上敘述,它們分別為3000公尺,1500公尺及300公尺,雖然模式的最頂層一直延伸至100mb,但是梅雨系統的垂直發展並不十分明顯,而且我們有興趣的現象是解析梅雨低層噴流及地形所牽引的中小尺度運動,以下所有的討論僅限於低層的大氣運動。圖9為初始虛位渦場(virtual potential temperature),時間是1987年5月14日00Z,圖10~圖12分別為三個等高面上的預報及校驗位溫圖。

由校驗圖(NMC分析場)看出300公尺高度上(圖10a,b)模式區域內北邊溫度槽向東移動,南半部(約北緯25°以南)溫度梯度不大,在1500公尺高度面上(圖11a,b)溫度槽較為明顯且較向南延伸,溫度梯度較大的條狀區間也偏南,整個系統隨高度向北傾斜。在300公尺(圖12a,b)一半區間都在地形之下,海面上的鋒面帶在台灣東部外海。預報的虛位溫與NMC分析場相當接近,在300公尺高度上(圖12c,d)台灣附近的溫度較實際溫度略低。

1500公尺高度上(約850mb)預報虛位溫場(圖11c,d)在台灣、武夷山和四川盆地上發生小尺度的擾動,由於解析度的限制,這些擾動並不能從NMC的分析場得到證實,但是可以由地形效應上加以解釋。低層東風(在下一小節再顯示預報結果)因台灣中央山脈的阻隔,一方面產生繞山環流,一方面產生爬山運動。垂直運動造成在迎風面絕

熱冷卻，背風面絕熱增溫，形成溫度擾動。在海峽南面，南風（繞山運動）帶來暖平流，溫度增加的趨勢更為明顯。下游區域又受到武夷山的影響，最後在圖上顯示為槽脊槽脊交錯的波狀結構，此外台灣海峽的溫度梯度也因繞山運動而變得很大。在同一緯度上比較槽脊的溫度差值高達 2~3 度這可能是不太實際的，如果在模式中加入地面摩擦效應，地面風速不致於像模擬結果那麼強，而溫度擾動也會較弱。同樣地在四川盆地虛位溫亦因下沉增溫而比 NMC 分析的位溫值高很多。

2 風場

初始風場（圖 13）在高層主要是西風，3000 公尺高華南區域西南風很微弱，地面附近，台灣區吹北北東風，日本上空的低壓槽亦可由初始風場中辨別出來。模式預報高層風（圖 14b, 15b）在華南一帶比 NMC 分析（圖 14a, 15a）強許多，在模式中當氣流（西風）自青康藏高原而下時，因位渦度（potential vorticity）的保守關係，再加上絕熱增溫作用，在青康藏高原邊緣形成低壓，風速增強，值得注意的是數值模式能夠處理陡峭的地形，即使是斜坡在側邊界上，也不會發生計算上的困難。

圖 16~19 是 1500 及 300 公尺高度上校驗與預報風場，12 小時預報（圖 16b, 18b）與 NMC 分析（圖 17, 19b）與 NMC 分析（圖 17a, 19a）相接近，300 公尺處（圖 19a, b）台灣附近模式預報是由北北東風轉為東北東風，華南地區南風增強，日本附近的低壓槽移出計算區域亦可由模式風場驗證。

正如溫度場的情形一樣，在受地形影響的局部區域，預測風場發生的擾動並無法由 NMC 資料得到證實，300 公尺 24 小時預報（圖 19b）台灣附近的繞山運動相當明顯，風速也很強。

圖 20 及 21 分別為 12 小時及 24 小時垂直運動預報圖。24 小時預報 300 公尺高度上（圖 21c）華南一帶吹南風，因此沿海一帶垂直速度為正（上升），中南半島北部沿海則是下降氣流。台灣東部為迎風面，西部是背風面，亦與垂直速度一致。在 1500

公尺高度上，由於中央山脈、台灣海峽及武夷山地形分佈，造成沿西北—東南方向產生一連串上升下降運動，也造成上一節討論在這一區域小尺度波狀擾動的溫度分佈（圖 11d）。

六、結論

本研究以一三度空間原始方程式數值模式模擬了 1987 年 5 月 14 日到 15 日的 24 小時內實際大氣狀況。模擬結果中，較大尺度的大氣運動與 NMC 的分析大致上相當符合，高壓與槽線的移動及低層噴流的發展都可以由沒有摩擦力的簡化模式得到理想的結果，許多由真實地形（解析度是 75 公里）所引發的小尺度擾動則無法由 NMC 資料得到證實，由垂直速度的分佈，我們可推測這些擾動對局部區域的天氣有相當大的影響。至於這些擾動的真實性則需要進一步研究與實際觀測相比較，也需要日後以更高解析度的數值實驗研究地形對梅雨鋒面的影響。

研究結果顯示地形造成華南及台灣區同等大小尺度運動，擾動振幅也相當大，而這些擾動無法由高空觀測網所捕捉，因此在能完全肯定所模擬小尺度運動的位置、大小與實際情形相吻合之前，尚無法以模擬結果來校驗觀測資料，但是在 TAMEX 實驗探空資料所顯示許多小尺度不規則的變異性，相信可以由本研究結果加以解釋。

七、致謝

本研究計劃承國科會支助下完成，數值模式部份是與美國印第安納州普渡大學地球及大氣科學系商文義教授及陳俊達先生所共同發展。

參考文獻

- Akiyama, T., 1973a: Ageostrophic low-level jet stream in the Baiu season associated with heavy rainfalls over the sea area. *J. Meteor. Soc. Jpn.* 51, 205-208.
- , 1973b: The large-scale aspects of the characteristics of the Baiu front. *Pap. Meteor. Geophys.* 24, 157-188.
- , 1973c: Frequency occurrence of heavy rainfall along the north side to the low-level jet stream in the Baiu season. *Pap. Meteor. Geophys.* 24, 379-388.
- Davies, H.C., 1976: A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 405-418.
- Davies, H.C., 1983: Limitations of some common lateral boundary schemes used in regional NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1002-1012.
- Maddox, R.A., 1980: An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data. *Mon. Wea. Rev.* 108, 1108-1121.
- Matsumoto, S., and T. Akiyama, 1969: Some characteristic features of the heavy rainfalls observed over western Japan on July 9, 1967. Part I: Mesoscale structure and short period pulsation. *J. Meteor. Soc. Jpn.* 47, 255-266.
- , K. Ninomiya, and S. Yoshizumi, 1971: Characteristic features of Baiu front associated with heavy rainfall. *J. Meteor. Soc. Jpn.* 49, 267-281.
- Ninomiya, K., and T. Akiyama, 1971: The development of the medium-scale disturbance in the Baiu front. *J. Meteor. Soc. Jpn.* 49, 663-677.
- , and T. Akiyama, 1972: Medium-scale echo clusters in the Baiu front as revealed by multi-radar composite echo map. Part I. *J. Meteor. Soc. Jpn.* 50, 558-569.
- Sun, W.Y. and W.R. Hsu, 1988: Numerical study of cold air outbreak over the ocean. *Journal of Atmospheric Sciences*, 45, 1205-1227.

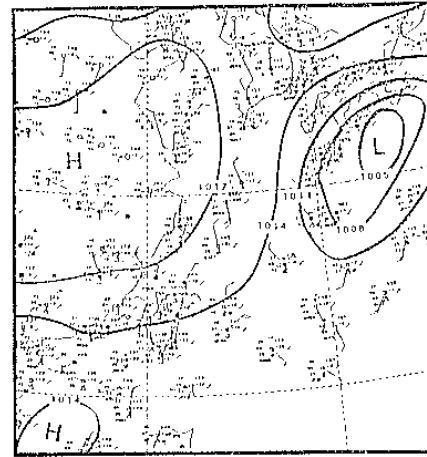


圖 1 1987 年 5 月 14 日 00Z 地面天氣圖

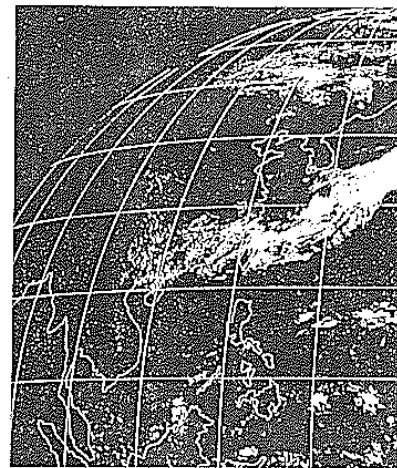


圖 2 1987 年 5 月 14 日 00Z 衛星雲圖

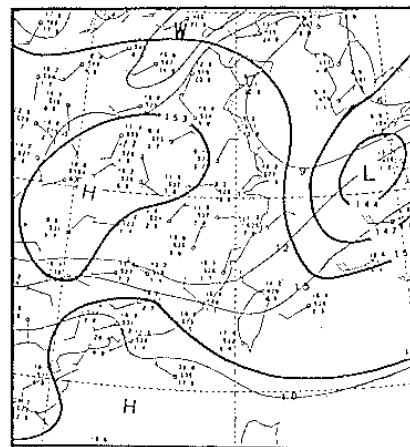


圖 3 1987 年 5 月 14 日 00Z 850mb 天氣圖

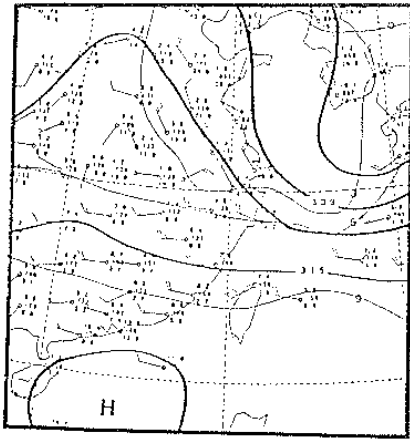


圖4 1987年5月14日00Z 700mb 天氣圖

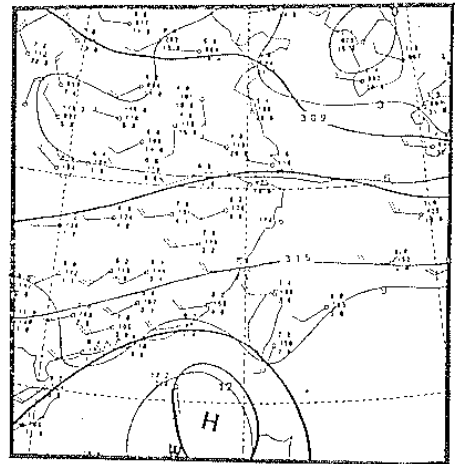


圖7 1987年5月15日00Z 700mb 天氣圖

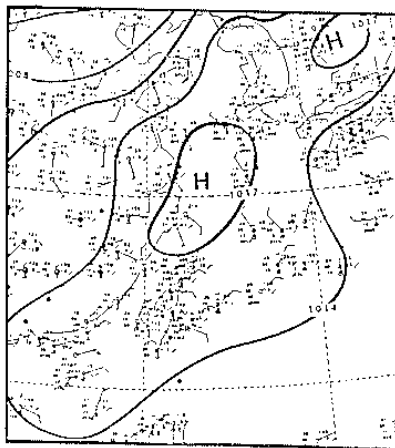


圖5 1987年5月15日00Z 地面天氣圖

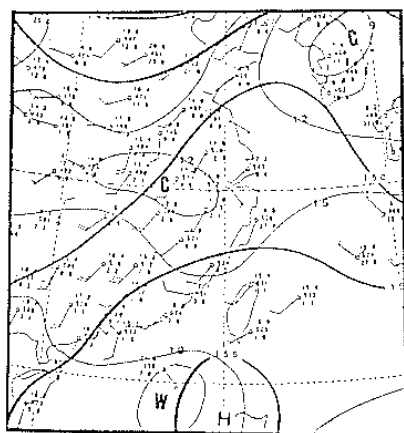
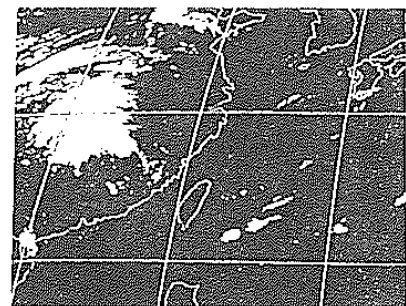
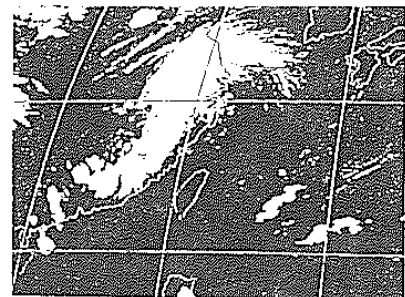


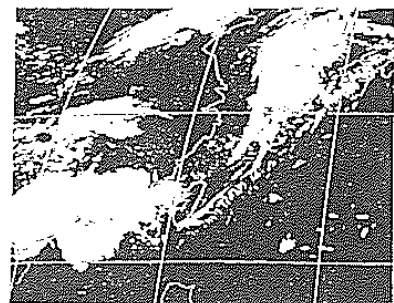
圖6 1987年5月15日00Z 850mb 天氣圖



(a)

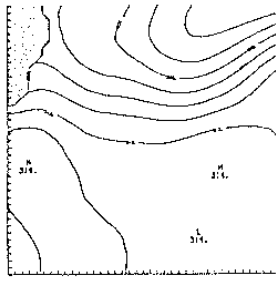


(b)

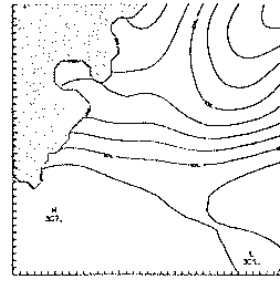


(c)

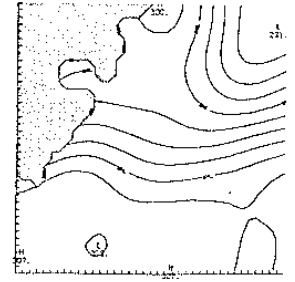
圖8 衛星雲圖 (a) 1987年5月15日00Z
(b) 1987年5月15日12Z
(c) 1987年5月16日00Z



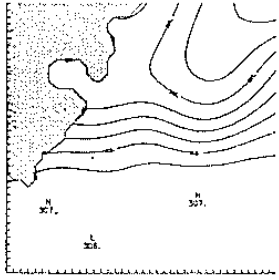
(a)等值線間距為 1.6°C



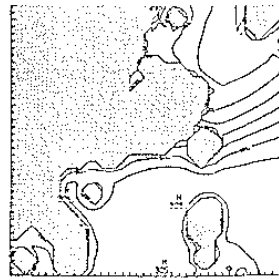
(a)等值線間距為 1.8°C



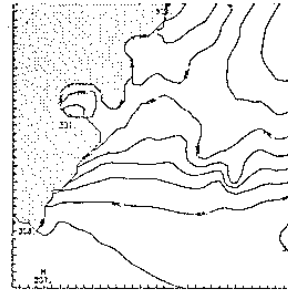
(b)等值線間距為 1.5°C



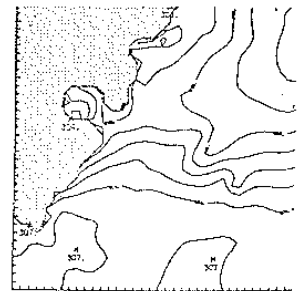
(b)等值線間距為 2.0°C



(c)等值線間距為 2.0°C



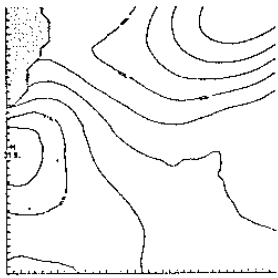
(c)等值線間距為 2.0°C



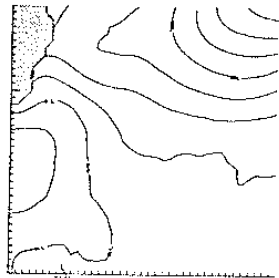
(d)等值線間距為 1.9°C

圖9 初始虛位溫 (θ_v) 分佈圖。陰影部份為山區
(a) 3000 公尺等高度面 (b) 1500 公尺等高度面 (c) 300 公尺等高度面

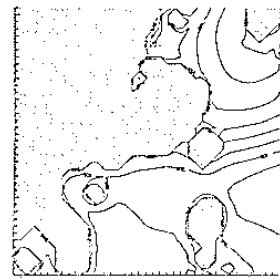
圖11 同圖(10)但為 1500 公尺等高度面 θ_v



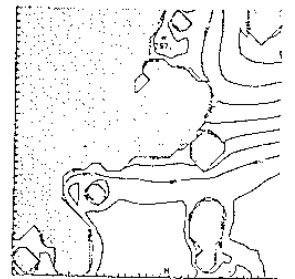
(a)等值線間距為 1.6°C



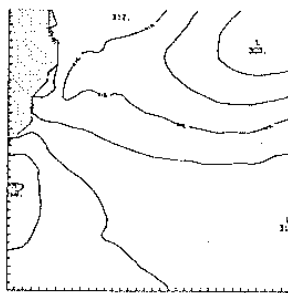
(b)等值線間距為 1.5°C



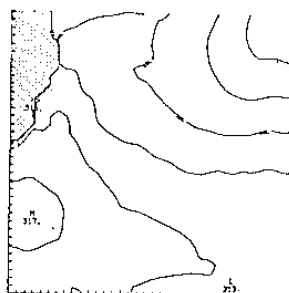
(a)等值線間距為 2.1°C



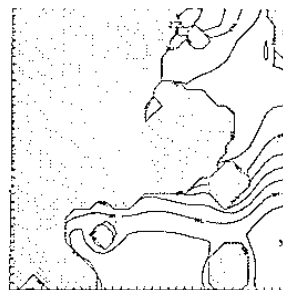
(b)等值線間距為 1.9°C



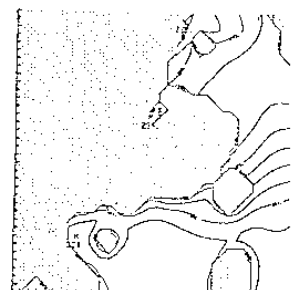
(c)等值線間距為 2.3°C



(d)等值線間距為 2.2°C



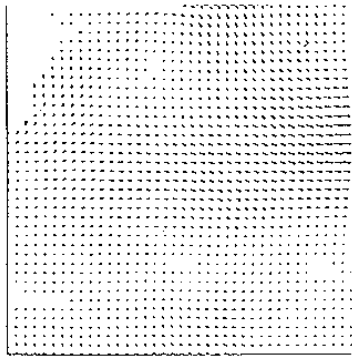
(c)等值線間距為 2.0°C



(d)等值線間距為 2.0°C

圖10 3000 公尺等高度面虛位溫 (θ_v) 分佈圖
圖 (a, b) 分別為 14 日 12Z 及 15 日 00Z 之
NMC 校驗圖
圖 (c, d) 分別為 12 小時及 24 小時模式預報

圖12 同圖(10)但為 300 公尺等高度面 θ_v



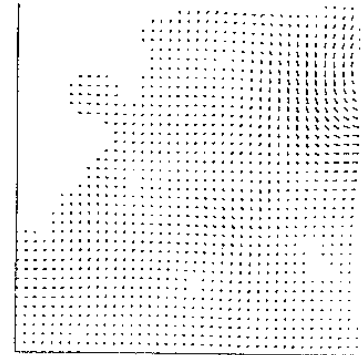
(a)風標長度相等於網格點

間距時代表風速 13.8 m/sec



(b)風標長度相等於網格點

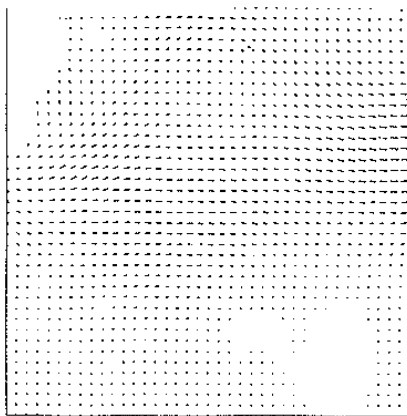
間距時代表風速 11.3 m/sec



(c)風標長度相等於網格點

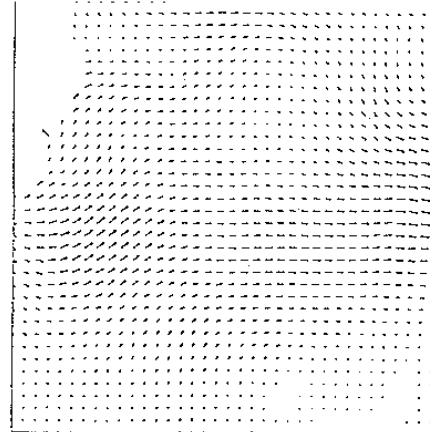
間距時代表風速 10.0 m/sec

圖 13 初始水平風分佈圖，空白區域為山區 (a) 3000 公尺等高度面
(b) 1500 公尺等高度面 (c) 300 公尺等高度面



(a)風標長度相等於網格點

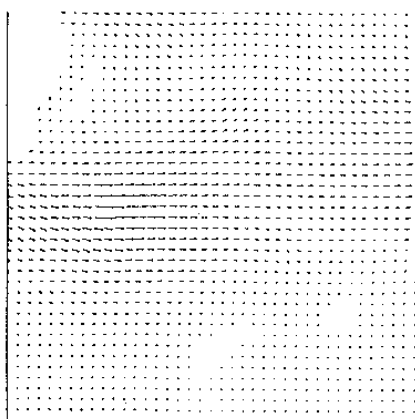
間距時代表風速 15.9 m/sec



(b)風標長度相等於網格點

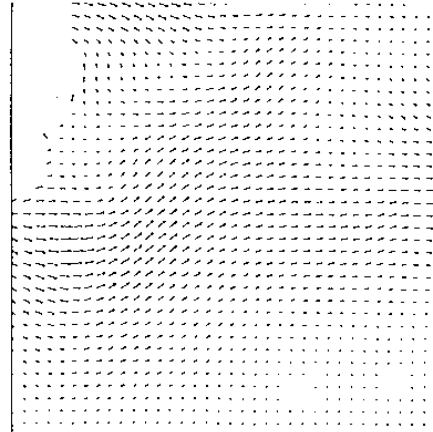
間距時代表風速 13.8 m/sec

圖 14 3000 公尺等高度面水平風分佈圖 (a) 14 日 12Z NMC 校驗圖
(b) 12 小時模式預報圖



(a)風標長度相等於網格點

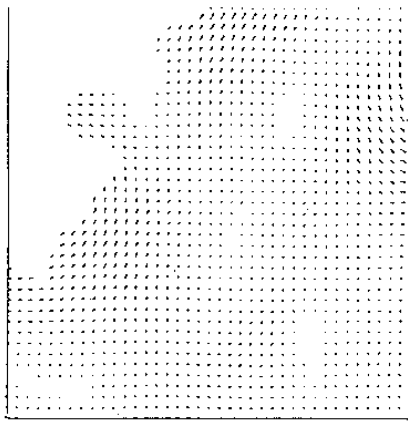
間距時代表風速 15.5 m/sec



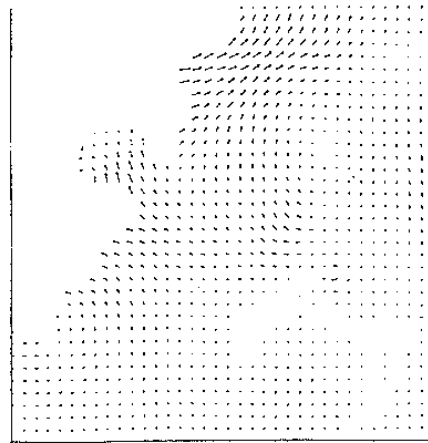
(b)風標長度相等於網格點

間距時代表風速 14.8 m/sec

圖 15 3000 公尺等高度面水平風分佈圖 (a) 15 日 00Z NMC 校驗圖
(b) 24 小時模式預報圖

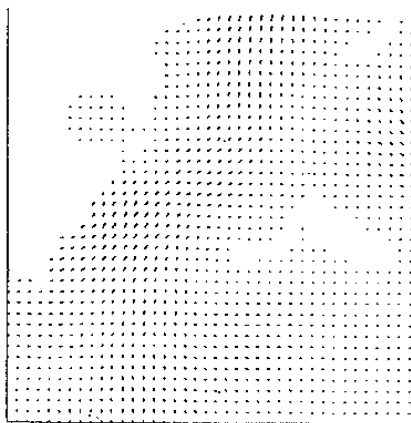


(a)風標長度相等於網格點
間距時代表風速 11.2m/sec

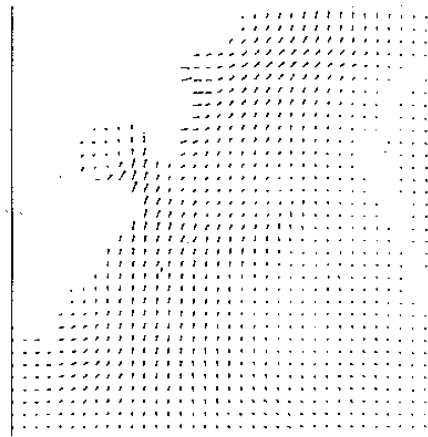


(b)風標長度相等於網格點
間距時代表風速 15.0m/sec

圖16 同圖(4)但為 1500 公尺等高度面水平風



(a)風標長度相等於網格點
間距時代表風速 13.6m/sec

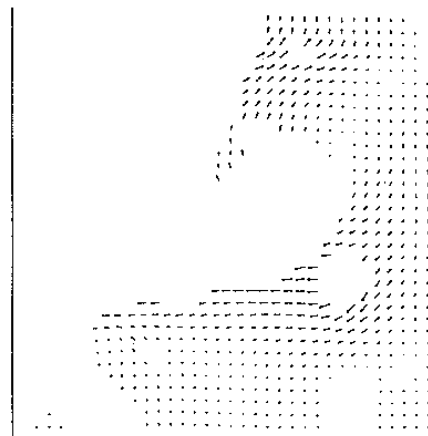


(b)風標長度相等於網格點
間距時代表風速 18.4m/sec

圖17 同圖(5)但為 1500 公尺等高度面水平風

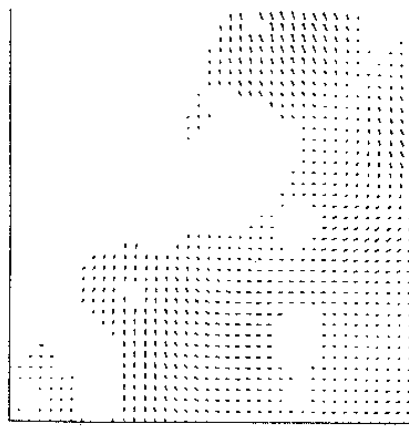


(a)風標長度相等於網格點
間距時代表風速 9.1m/sec

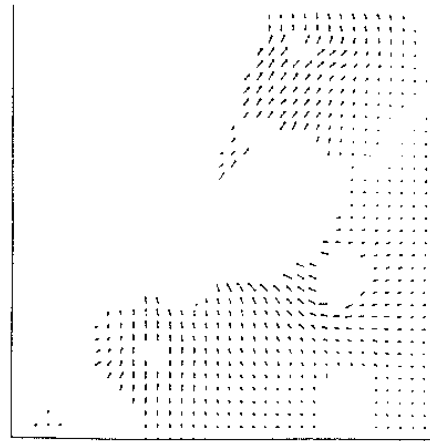


(b)風標長度相等於網格點
間距時代表風速 18.0m/sec

圖18 同圖(4)但為 300 公尺等高度面水平風



(a)風標長度相等於網格點
間距時代表風速 8.7 m/sec



(b)風標長度相等於網格點
間距時代表風速 17.8 m/sec

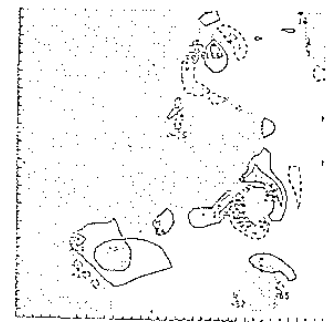
圖19 同圖(15)但為 300 公尺等高度面水平風



(a)等值線間距為 2.10 cm/sec

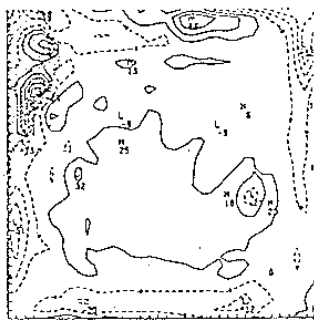


(b)等值線間距為 0.80 cm/sec

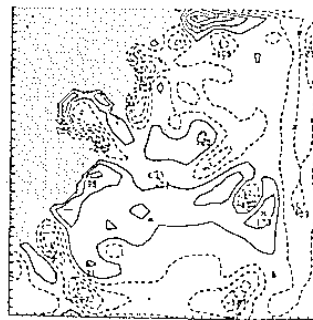


(c)等值線間距為 0.50 cm/sec

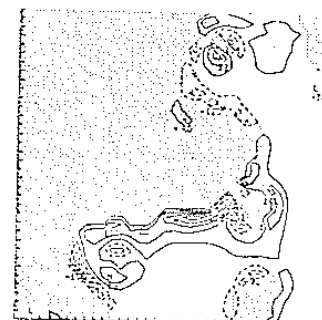
圖20 12小時模式預報垂直速度分佈圖(a) 3000 公尺等高度面
(b) 1500 公尺等高度面(c) 300 公尺等高度面



(a)等值線間距為 1.83 cm/sec



(b)等值線間距為 0.65 cm/sec



(c)等值線間距為 0.42 cm/sec

圖21 24小時模式預報垂直速度分佈圖(a) 3000 公尺等高度面
(b) 1500 公尺等高度面(c) 300 公尺等高度面