

台灣中央山脈所引起之颱風環流中之副流分析

王時鼎 蔡清彥 林民生

中央氣象局

摘 要

本文係藉四次颱風之例，其中兩次為經過台灣中央山脈北部，即1962年之Opal與1971年之Bess，及兩次經過中央山脈南部與南端，即1975年之Betty與1962年之Dinah，予以分別研究因中央山脈所引起颱風環流中之「副流」(secondary flows)現象。所用資料與其分析，包括：各颱風侵台期間藉中尺度分析方法所作地面天氣圖上之逐時流場、氣壓場分析，台灣中央山脈兩側自北至南各測站地面風及氣壓之逐時變化分析。研究結果發現，中央山脈所造成邊界層，根據氣流進入角(α 角)及颱風中心相對山脈位置不同，計可分為三類邊界層，即：(1)摩擦邊界層，(2)阻擋邊界層，與(3)分流邊界層。由於颱風流場受阻於「內在障礙體」(inner barrier)，而造成局部氣流之分流與合流現象。此處計發現有三種「風切線」。分別由「繞山流」與「颱風旋流」，海峽之「明渠流」與重整後之「颱風旋流」，以及山脈北端兩側「沿山流」輻合所造成。此處分別稱之為第一、第二及第三類風切線。而最有興趣者當為，Betty與Dinah颱風中心進入海峽南部時，颱風「旋流」、海峽「明渠流」、與中央山脈三者交互作用，在台灣西部所造成之廣大弱風「尾流區」及其變化，並經作較詳細分析。其中Dinah颱風之「尾流區」中之中尺度低壓(meso low)並發展為中尺度渦旋(meso vortex)。其他所注意及之「副流」，尚有下坡流造成之「焚風」與山脈迎風面之「氣流分流」與「停滯區」等。另外，兩次登陸北部之Bess與Opal颱風，登陸前後，其近中心部分之流場與氣壓場水平結構變化亦經作初步分析。

一、前言

地形對大氣運動的影響，一直為困擾大氣科學研究者的最重要問題。無論中尺度或大尺度地形之影響，近年並已引起普遍注意。較遠者如西藏高原對大氣運動影響之實驗研究；較近者，如1984年ALPEX實驗研究，均以地形之影響為目標。而我國於1987年之TAMEX實驗及其後1992年

Post-TAMEX預報實驗，地形影響均為主要目標之一。在台灣由於中央山脈為獨立於海中之極為標準之中尺度山系，其南北長約近2.5緯度，近中間之最濶之處約接近1個緯度，平均高度略為3000公尺(參見圖1)。而侵台颱風之尺度略與中央山脈尺度相若。兩者間之交互作用研究包括路徑變形

氣壓場特徵、流場特徵、及垂直結構特徵等，已為甚多專家研究對象，包括：王（1954、1963、1989、1991(a)、1991(b)），王等（1975），Brand等（1974），Ishijima與Estoque（1987），曲（1976,1977）等。Chang（1982），Bender（1987）等主要根據Wang（1980）之觀測研究作過對侵台颱風路徑變形之數值模擬。最近Wang（1991），Chang, Yeh等（1991），Yei與Elsberry（1991），蔡與王（1992）並更對侵台颱風地形影響作過進一步的分析。而本文的主要目標，為對在台灣中央山脈影響下颱風環流中副流（secondary flows）之分析。其系統尺度係屬meso- β 與meso- γ 大小。有關於此，過去甚少有學者注意及之，而此項尺度重要現象，如：侵台颱風因山脈影響造成邊界層流場，包括氣流分離（flow separation）、尾流區（Wake zone）、氣流分流（flow splitting）、氣流停滯區（stagnation zone），以及颱風環流內之局部風切線（shear line）、噴流（jet）等。此不但影響侵台颱風場之結構變化，並嚴重影響各地颱風風力預報。本文係藉四次侵台颱風個例，就上述這些現象作一初步分析。

二、所用資料及分析方法

(一)本項研究所用颱風資料

1. 經過台灣中央山脈北部之兩次颱風，即：1962年8月之Opal，與1971年9月之Bess。該兩颱風在接近台灣時，中心最大風速均達120 kt以上。經過山脈北部時，路徑相若（參見圖2之颱風路徑圖）。主要之流場特徵大致相同。最大的不同點在，當颱風登陸後氣流

進入角（ α 角）大，颱風旋流受阻於山脈，產生阻擋現象時。Bess 颱風在中央山脈東側產生顯著之「下坡流」「焚風」效應。而Opal 颱風則無。

2. 經過台灣中央山脈南部之兩次颱風，即：1962年10月之Dinah，與1975年10月之Betty。該兩颱風在接近台灣時，中心最大風速均在90至100 kt之間，Betty之中心在台東以南越過山脈南端。Dinah 颱風之中心則經過恆春近海（參見圖2之路徑圖）。該兩颱風經過台灣時，邊界層中流場之主要特徵大致相同。最大不同點，亦在氣流進入角大，颱風中心進入海峽時。Betty 颱風旋流在山脈東側上風面（upstream），因阻擋（blocking）所造成之低層氣流現象為「爬山流」，而Dinah 則於上風面造成「氣流分流」（flow splitting）及「停滯區」（stagnation zone）。

(二)本項颱風環流中「副流」（secondary flows）研究所用氣象資料及分析法

地面風場亦即邊界層中流場之逐時中尺度分析。

地面氣壓場之逐時中尺度分析。

山脈東西兩側各測站之風、氣壓及溫度（焚風效應）逐時變化圖分析。

地面自記紀錄分析。

高空資料分析。非常可惜的，於颱風侵襲之關鍵時間，探空往往停放，而使甚多有趣中小尺度流場現象之三維分析，發生困難。

(三)颱風環流中「副流」（secondary flows）

由於中央山脈係呈「梭狀」之地形，最高處在台東與蘇澳之間，平均高度略在3200公尺，向南北側下降，而東側坡度，又大於西側，特在

花蓮以北蘇花公路一帶為最大。山脈長軸略為 20° 至 200° 之走向。500公尺高度之範圍，東西略寬80公里，南北略長300公里屬相當標準之中尺度(mesoscale)山脈(參見圖1)。當颱風旋流經過中央山脈時，略可以颱風位置是否在 120° 至 122°E 以內，及進入氣流角之大小($\leq 60^{\circ}$)而分別討論。一般而言，進入角(α)小及颱風中心未在台灣陸上時，主要屬「通道流」(Channelling Flow)。台灣區邊界層中最主要現象為「阻擋邊界層」(blocked boundary layer)與一般因切應力(shearing stress)所造成之「摩擦邊界層」(frictional boundary layer)，以及台灣海峽之「明渠流」(open channel flow)與山脈南北兩側之「角隅流」(corner flow)等。此將在討論有關部分時，將再作定義。當旋流進入角(α)大時，所造成者為，在上風面阻擋(blocking)，與氣流偏向(deflection)，形成「爬山流」(upslope flow)、「迎風脊」(windward ridge)或「繞流」(deflected flow)現象。而在氣流下風面(downstream)之現象，則遠為複雜。最主要者為「氣流分離」(flow separation)、「尾流區」(wake zone)、「風切線」(shear line)、「輻合線」(convergence line)、「背風槽」(lee trough)「中尺度低壓」(meso low)、「中尺度渦旋」(meso vortex)等。

有關於此處侵台颱風環流中之「副流」特徵討論，所用名詞一般悉依照教科書上者重要名詞將在文中再加定義。

三、結果討論

(一)當氣流進入角(α)小時，邊界流(boundary layer flow)之生成、發展與分類

就此處四例研究，在颱風侵台時，當氣流進入角約 $< 70^{\circ}$ ，亦即為「沿山流」時。

(註：此處所謂氣流進入角，乃指颱風進入氣流方向與中央山脈長軸方向，約 20° ，之夾角，進入氣流方向以彭佳嶼、台北、桃園平均氣流方向表示)。

因中央山脈為「內在阻礙物」(immersed barrier)，計可生成三種邊界流(boundary layer flow)。此處稱之為(1)摩擦邊界層(frictional boundary layer)流場，(2)遮蔽邊界層(sheltered boundary layer)流場，與(3)分流邊界層(separated boundary layer)流場。

以下茲就四例颱風情形下作一討論：

1. 摩擦邊界層流場

此為一般流動遇到固體邊界(solid boundary)，因摩擦應力(shearing stress)，造成「動量損耗」(momentum loss)所產生之必然現象。風沿邊界層向內減小，風向不變。在邊界上摩擦切變應力(τ)可表示為： $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$ ， μ 為流體黏性係數， $\frac{\partial u}{\partial y}$ 係垂直於固定邊界之風切。類此邊界層僅有此項因表面摩擦(skin friction)引起風切效應，故有別於後兩「邊界層」，而稱之為「摩擦邊界層」。在層狀邊界層(laminar boundary layer)中，其邊界層水平寬度(δ)，可以下式表示。 $\delta = \sqrt{\frac{\nu \ell}{U}}$ 。式中， ν 為流體運動黏性係數， ℓ 為內邊界長度， U

為邊界以外之流動速度。故藉該式略可見邊界層寬度係與內邊界之長度開平方成正比，與U開平方成反比。

以下為對該四次颱風「摩擦邊界層」之討論：

有關「摩擦邊界層」，Opal 颱風提供極佳之例。此可參見圖 3(c)及圖 11(b)。由圖 3(c)可見，山脈兩側颱風氣流轉為沿山而行（原屬阻擋邊界層，參見圖 11(b)，下再討論），邊界層內風切普遍增大。台南一帶之水平風切，於 25 公里內達 20 kt。同時，由圖 11(b)，台灣中央山脈西側各地地面風時間剖面圖亦可見，台南空軍測站（附有括號者）於 5 日 08 至 13 UTC，北來風由 5 kt 增至 40kt，由此可見切變層變化之顯著。其他各颱風情形，參見圖 2(b)。

2. 阻擋邊界層流場

此處所謂「阻擋邊界層」，係因中央山脈並非為平滑之紡錘狀，苗栗以南一帶雪山山脈終止，山勢向內凹入，以及阿里山餘脈終止於台南一帶，故中央山系西側，因颱風氣流受遮蔽作用，極易出現「阻擋邊界層」。阻擋邊界層流場之特徵為可繪出一自由氣流線（free streamline），將未受地形阻擋之氣流與受遮蔽區或稱「風蔭區」（wind shadow region）之氣流分隔，風蔭區之氣流均勻，由觀測可見均小於 10 kt。故 10 kt 之等風速線可視為「自由氣流速度」（free-stream velocity）。此亦可藉 Opal 之例（參見圖 3(a)與圖 11(b)）以見出。由圖 3(a)可見，自由氣流線，亦即 10 kt 之線（點線）係自台中一帶，向南彎曲與山脈東側 10 kt 之線會合於恒春以南海上，亦即為重聚點（reattachment point

）。該線距屏東山區濶約 50 公里。在該自由氣流線至山區邊界之間，各測站風力均在 02 至 07 kt 之間（註：如台南有風向而無風速，表 2 kt，風速桿為一半時表 3 至 7 kt）。而該一甚大區域之小風區（副流）顯為颱風氣流受遮蔽作用（sheltering effect）所引起另參看三之(一)中之 3 討論（可參見該圖中台灣海峽呈「明渠流」狀之流場）。另外圖 7(a)為與圖 3(a)相同時間地面氣壓場分布。顯見在氣壓場中，颱風旋流之「遮蔽區」為背風槽所在，氣壓梯度極小，故藉此可見有一定型式之氣壓場支持（按，山脈東側可見一迎風脊）。其他各颱風之此類邊界層分布參見圖 2(b)。

3. 分流邊界層流場

「分流邊界層」為邊界流（boundary layer flow）中最有興趣之一項課題。由於流動在邊界層上因表面摩擦，而流速減小。最後在邊界層上出現「分流點」（separation point），而出現「分流邊界層」，與「分界氣流線」（dividing streamline）外之流動間分開，其內並形成「尾流弱風區」（wake zone）。該項流場基本上係屬不穩定者，於有利情形下可形成颱風副中心或副渦旋（詳見後述），而支配颱風之未來運動（蔡、王，1992，王 1980）。有關分流邊界層討論此處仍以 Opal 颱風為例，參見圖 3(a)、3(b)、7(a)、7(b)及圖 11(b)。藉圖 11(b)中央山脈西側風場逐時變化圖中，可見於 5 日 02 至 12 UTC，廣大之尾流區出現於台中至恒春之間。特以台南兩測站（空軍、氣象局）與空軍之岡山、屏東、佳冬三地比較，風向相反，形成一穩定風切線型式，但風力略均在 7 kt 以下

。再核驗圖 3(a)與 3(b)，顯見在流場圖中之該處有分離渦流 (separated eddy) 出現。再參考圖 7(a)及 7(b)，該分離渦流並獲氣壓場支持。該處有一中尺度弱低壓存在。此亦即氣流方向有反向氣壓梯度以支持該小渦流，此亦為「分流邊界層」內之最著特徵。

(二)中央山脈引起之颱風流場內之風切線 (shear line)

極有興趣的，在颱風如此強烈及有系統之環流中，可出現局部性而且極有系統性，因山脈影響造成氣流局部輻合線 (convergence line)。在氣流輻合線中，又可分為兩類。一類為輻合線兩側氣流交角甚大，此類輻合線稱「風切線」 (shear line)。此處定義當兩側風向相互間交角 $\geq 50^\circ$ ，風速 ≥ 10 kt 時稱之。另一類流線交角 $\leq 50^\circ$ 時，則逕稱「輻合線」。由定義可知「風切線」又較「輻合線」為重要，故本文之「副流」僅討論颱風風場中之「風切線」。以此處四例而言，除 Dinah 颱風路徑均在山脈之南，未見發生局部風切線外，其餘三次颱風均有發生，此可參見圖 2(a)各颱風路徑旁之細斜線 (係代表風切線存在期間及其伴隨颱風中心之相對位置)。風切線為侵台颱風流場中重要之「副流」 (secondary flow) 之一，又可分為三類，且各有其特定型式，以下茲分類討論：

1. 繞山流與颱風本身旋流間所造成之風切線——第一類風切線

在此處四例颱風中 Opal、Bess 與 Betty 均出現有第一類風切線 (category I shear line)。圖 2 為三颱風風切線發生時颱風所在位置及風切線持續時間 (見細斜線部分)。圖 3(b)、(c)為 Opal 颱風之該項風

切線位置及其運動變化。圖 4(a)為 Bess 情形。另外圖 11(a)、12(a)及 13(a)為上述三颱風過境時山脈東側各測站地面風向量逐時變化圖，粗斷線即為該類風切線位置及其逐時變化。圖 16(a)、(b)、(c)中含該類風切線位置及運動圖。藉圖 3(b)、(c)及圖 4(a)可見該項風切線顯係颱風旋流繞過中央山脈西側，再與在山脈東側颱風旋流輻合所造成，故顯為山脈效應之結果。此類風切線均出現於山脈東側，均無例外 (參見上所述各圖，特以圖 16(a)、(b)及(c))。藉圖 3(b)(c)及 4(a)可見，風切線兩側之風向交角均甚大。圖 4(a)為 Bess 颱風情形，線之兩邊風向為相對吹送，風力亦強。藉此亦可見中央山脈對颱風環流影響之鉅。繞山流除造成此處所述「第一類風切線」外，另一項重要性為使某些地區風力增大。

2. 颱風中心在台灣海峽南部時颱風旋流與海峽「明渠流」所造成之風切線——第二類風切線

此處所以稱「第二類風切線」 (category II shear line) 者，乃成因不同之故。此為當颱風移入海峽南部時颱風旋流與海峽中來自東北之「明渠流」相輻合造成。在本文四次個例中，其中兩次中心經過台灣海峽南部之 Betty 與 Dinah 颱風，均明顯可見。圖 2(a)為該兩颱風所在位置與風切線出現之關係 (見細斜線部分)。圖 5(b)、(c)為 Betty 颱風情形 (見粗斷線)。圖 6(b)、(c)、(d)為 Dinah 颱風情形 (見粗斷線)。圖 13(b)、14(b)為該兩颱風過境時，山脈兩側各測站地面風向量逐時變化圖。粗斷線所示則為該類風切線位置及逐時變化。圖 16(c)、(d)所示為該類風切線位置及其運動。藉圖 5(b)、(c)及圖 6(b)、(c)、(d)地面流場圖

，因風切線均恰過澎湖兩測站，由風向與風速變化可明顯見出其演變過程，並研判確為該颱風旋流與明渠流兩流制 (flow regime) 交互作用之結果。由以上所有各圖均可見，本類風切線僅限出現於海峽地區與第一類風切線出現於台灣東部情形恰相反。兩類風切線均隨颱風西移而向北移動。

3. 颱風中心在海峽北部時颱風旋流與彭佳嶼處「角隅流」所造成之風切線——第三類風切線

第三類風切線 (category III shear line) 亦有極明顯之區域性，僅限出現於台灣北部向西北外海之區域，此處所見 Opal 與 Bess 颱風均然 (圖 2(a))。其成因亦至為明顯，由圖 7 (d) 之 Opal 與圖 8 (c) 之 Bess 地面流場圖均可見，係由於在海峽北部向北沿山而行之颱風旋流與中央山脈東北側之「角隅流」大風 (中心區約在彭佳嶼一帶，各見該各圖) 輻合所造成。且均發生於颱風中心在新竹地區出海至移至大陸之時 (圖 2(a))。該類風切線之存在，亦可在圖 11 (b) 與 12 (b) Opal 與 Bess 颱風於山脈北部各地風向量時間變化圖中，明顯可見風切顯著，且均接近颱風之中心，是為特色 (各見圖中之粗斷線)。並由圖 12 (b) Bess 颱風該類風切線處風力變化 (見細斷線)，風切線處風力減小，顯有輻合作用存在。另外圖 16 (a)、(b) 亦繪有該「第三類風切線」空間位置變化圖，藉供與其他各類風切線比較參考。

(三) 由中央山脈引起颱風環流內之山脈背風面「弱風尾流」(wake)

弱風尾流區的生成發展及其演變可能為台灣，中央山脈與颱風旋流交互作用最有興趣「副流」(secondary flow) 之一。背風面「弱風

尾流區」略可分為兩類。茲分別討論如下：

1. 當氣流進入角 (α) 小，颱風中心尚在台灣東方近海，主流為沿山脈流動時所造成之「弱風尾流」。

此在上述(三)一(一) 2 及 3 「阻擋邊界層」與「分流邊界層」二節中，已略論及。基本上在此情形下，尾流應局限在該兩邊界層以內，且必須在颱風氣流影響下，邊界層以外有出現 10 kt 以上之風速。因「自由氣流速度」即定義為 10 kt。在「阻擋邊界層」內之弱風區，無明顯風力梯度，風向略一致，而且風力需在 7 kt 以下 (參見圖 11 (b) Opal、圖 13 (b) Betty 與圖 14 (b) Dinah，颱風移近 α 角小時，西部及南部地面風力逐時變化圖，及圖 3 (a) Opal 颱風地面流場分析圖)。且在該區內無明顯氣壓梯度 (參見圖 7 (a) 及圖 14 (c))。在「分流邊界層」內之「弱風」(wake)，基本上同上述「阻擋邊界層」內者之特徵，惟風向並非一致，而略有渦流 (eddy) 狀之結構。參見圖 11 (b) 及圖 3 (a) Opal 颱風有關台南、屏東、佳冬一帶之風場分布。必須特別強調「尾流區」因與「邊界層」相接，而在該邊界處一般言，有頗強之速度梯度 (velocity gradient) 並有渦度 (vorticity)，為一甚不穩定之流場結構。例如，此處所述 Opal 颱風之例，隨後尾流區趨於消失，而轉為三(一)一 1 所討論之「摩擦邊界層」。此項邊界層之特徵為，無「自由氣流線」將「颱風主流」隔開，全層有甚大風切 (wind shear)。邊界層內風力不必一定在 10 kt 以下 (參見圖 3 (c) Opal 颱風之流場圖，且全層均有明顯氣壓梯度 (參見圖 5 (c) Opal 颱風之地面氣壓

分析圖。

2 當氣流進入角 (α 角) 大, 亦即在「阻擋流」(blocked flow) 情形下, 山脈背風面之「弱風尾流」。

此可說在台灣颱風受山脈影響之「邊界流」(boundary layer flow) 中之最引人入勝部分, 無論理論上及應用上均深饒興趣。在應用上, 因為當弱風尾流區出現時, 頗為穩定, 且範圍頗廣 (只要山脈迎風面「阻擋流」繼續存在時), 如提高警覺, 可相當可靠的預測此一颱風強烈風場中之「無風區」。特以當颱風來襲時, 風速 ≥ 7 級風則需放假的規定下, 如不考慮此項特徵, 必將注定預報結果為趨於失敗。另一重要特徵為, 在某些特定情形下, 該弱風尾流區內可能展出颱風副環流中心, 並竟至取代原颱風中心地位, 而使路徑出現不連續 (王 1980, 1991, 蔡王 1992), 可嚴重影響颱風路徑預測。在學理上, 此類弱風尾流之生成、發展、維持及發展為副環流中心等之理論, 仍有待準確建立。此處之 Dinah 與 Betty 兩颱風, 恰提供了此項有關「阻擋流」下的山脈背風面出現範圍廣大及持久之「弱風尾流」之兩次實例。以下為僅就該兩例颱風之此類有關資料提供憑證 (documentation), 並作簡要討論。

有關於此, 此處準備資料包括 Betty 與 Dinah 颱風該項「尾流區」生成發展, 及演化 (evolution) 之地面流場圖如圖 5 (a)–(c) 及圖 6 (a)–(d)。與地面氣壓場圖如圖 9 (a)–(c) 及圖 10 (a)–(d), 該兩颱風於中央山脈西側各測站地面風向量逐時變化圖如圖 13 (b) 與 14 (b), 另外, 該兩颱風之廣大「弱風尾流區」之範圍

逐時變化圖如圖 16 (c) 與 (d), 由圖 13 (b) 與 14 (b) 提供了該類尾流區內的風場水平分布結構, 可見有流場之輻合渦流 (vortex), 但強度甚弱, 風力均在 7 kt 至 2 kt (圖中風力半條桿代表 3–7 kt, 有風向桿而無量代表 2 kt, 各見該兩圖右方中部點線區中之報告)。尾流區持續時間, Betty 颱風在 14 小時以上, 係向北位變 (shift 或 displacement), 最大時, 擴展至嘉義 (含) 以北至新竹 (含)。Dinah 颱風持續達 7 小時, 而後轉變為一具有相當顯著環流之颱風副低壓中心 (見後述)。由圖 16 (c) 及 (d) 可看出該兩颱風該類弱風區水平範圍, 每隔 3 小時間隔之有系統性之位變及當其出現時颱風中心相對位置。藉圖可見其乃作極有規則的向北位移, 最北可移至涵蓋新竹地區, 且與進入海峽後之颱風位置與範圍有一定關係。由圖 2 可見其生成須颱風中心移至 120° E 及以西。由圖 5 (a)–(c) 與 6 (a)–(d) 可見該兩颱風「弱風尾流」之生成係分別由於過山後重新組織之「颱風旋流」(TRF) 與台灣海峽原颱風旋流解體 (breakdown) 所造成之「明渠流」(open channel flow) (可參見 Wang, 1991) 兩流制 (flow regime) 與中央山脈交互作用所造成。圖 9 (b) Betty 颱風之例, 氣流之分離點 “ A ” (separation point) 有兩: 一在新竹附近, 一在屏東附近。重聚點 “ B ” (reattachment point) 在台南外之海峽中。尾流區略呈三角狀。至圖 5 (c), “ B ” 點已移過澎湖。而由圖 5 (a) 可見, 當 Betty 颱風中心移過中央山脈南端時, 氣流為沿中央山脈西側順山南行, 風力甚大, 明顯的尚未見有「弱風尾流」的形成。由圖 6

(a)–(c) *Dinah* 情形可見，有關其「弱風尾流」的生成發展過程略同 *Betty* 圖 5 (a)至(c)。圖 6 (a)時，尚未產生「尾流」。圖 6 (b)，「B」點在澎湖東南海上，澎湖區仍在明渠流範圍中，圖 6 (c)時，「B」點已明顯移至澎湖以北，澎湖已略在颱風環流範圍內。由圖 9 (b)–(c)與 10 (b)–(c)可見，弱風尾流區與山脈西側背風面副低壓區略一致，並可見其氣壓梯度均小。而山脈東側，因氣流受阻爬山，致有明顯之迎風脊產生。圖 15 為 *Dinah* 颱風過境期間山脈東西兩側測站地面氣壓差值圖 ($\Delta P = P$ (東側) – P (西側))，正值表東側者氣壓偏高。藉圖可見，氣壓差最高有達 18 mb，示「阻擋作用」之顯著。因此類背風面之「弱風尾流區」，僅在氣流進入角 (α 角) 大、「阻擋流」顯著、且颱風中心已移入海峽南部時，才可能發生。

四 分流邊界層上颱風副環流 (渦旋) 中心生成之例

在此處討論之四例颱風中，*Dina* 颱風提供了一項極特殊且極佳，在分流邊界層上颱風副環流 (渦旋) 中心生成之例。由圖 6 (c) 之 2 日 01 UTC 圖可見，在背風尾流區已略可見一氣旋式之弱渦流 (eddy)，在台中一帶，配合圖 10 (c) (01 UTC) 在等壓線分析圖上為一中尺度低壓 (meso low)，氣壓梯度甚弱。二小時後至 03 UTC 在新竹之南已形成一具有氣旋式環流之渦旋 (vortex)，並可繪出 1 mb 間隔三條封閉等壓線 (圖略)。至 04 UTC 時，已發展成明顯颱風副環流 (渦旋) 中心 (圖 6 (d))，並伴隨有 1 mb 間隔三條封閉等壓線 (圖 10 (d))。藉圖 14 (d) 與 (e) 山脈南側各測站之地面風與氣壓時間剖面圖 (圖略)，亦可明顯見出除 *Dinah* 颱風主環流

中心外，有一副環流中心在新竹以南，該地之氣壓較台北低達 6.9 mb。探討何以無環流之中尺度低壓 (meso low) 在約一小時內 (02 UTC 至 03 UTC 之間) 發展成有環流之中尺度渦旋 (meso vortex)，此處認為與該處分流邊界層自由氣流線處，因有極大 Kelvin-Helmholtz 式之風切，而形成強烈「切變不穩定」所造成。因該處之風為氣旋式之風切，故造成氣旋式渦旋。

(五) *Bess* 颱風中心在台灣北部登陸後，在東部成功一帶造成強下坡流——焚風 (Föhn)。

在此處四例颱風中，*Bess* 颱風提供以極佳之「下坡流」造成焚風之例，此亦為邊界層流場重要特徵之一。

首先參見圖 17 成功測站該颱風侵台時風、溫度與相對濕度之自記紀錄如圖 17 (a)、(b) 及 (c)。約地方時間於 22 日 20 時 45 分 (12:45 UTC)，可見成功風力與溫度均突增，相對濕度則為急劇下降，溫度最高曾升至 36.8°C 為一標準之焚風事件 (föhn event)。此處配合自記紀錄各取該颱風造成台灣中央山脈東側風場三種重要階段 (Stage)，(1) 焚風出現前因山脈阻擋造成之弱風區 (wake zone) 時，(2) 焚風時，及 (3) 焚風後沿山「通路風」(channelling wind) 時之地面風場如圖 4 (a)、(b) 及 (c)。藉圖 4 (a)，可見花蓮以南之東側各測站為均第一階段之弱風區中 (參見圖 16 (b))，該圖中並可繪出一「第一類風切線」。藉圖 4 (b) 可見，無論成功、台東、大武、花蓮均有遠較其他各地為高之溫度，係在第二階段之「焚風期」中。另外，藉 4 (c) 可見，成功與台東之風力更見增大，沿山而行，溫度已明顯下降。並參見圖 17，顯見已進入沿山「通路風」流階段三。另外圖 8 (a)–(c) 為出現焚風及前後

共三階段時間之地面氣壓詳圖，發現其氣壓型式頗有不同。焚風前等壓線為沿山而行（圖13(a)）；焚風時已出現「迎風脊線」（圖8(b)）；及焚風後，迎風脊與背風槽均著，但在山區，等壓線平行山脈脊線（圖8(c)）。

由此處分析可見，在邊界層，雖流場變化複雜，但仍可作出流場系統性變化之分析，有助於對因山脈造成流場變化之認識與預報。

另外可發現Opal 颱風在登陸階段其路徑與此處所討論之Bess 颱風情形，極見相似，強度亦略相若。（參見圖2中兩颱風路徑等資料），但Opal 颱風並未見有焚風發生，此係與颱風結構不同有關。並發現當Bess 颱風在山脈東側發生焚風時，其上游玉山西北風高達45 kt（圖4(b)），前後時間且均有雨。而Opal 颱風時，玉山區一帶風力小過甚多，致結果亦各異。

(六)由Dinah 與Betty 颱風所見山脈迎風面「副流」特徵

此處發現在颱風過境時山脈迎風面可出現兩種不同之基本流場，即：在Betty 颱風情形下，處於迎風面之山脈東側各測站，均有顯著降雨，同時可見有明顯上之「上坡流」（upslope flow）（均各參見圖5(a)、(b)、(c)）；但在Dinah 情形，由地面風場分析，可發現上游阻擋作用（blocking effects）之效應，為造成氣流之「繞山流」（deflecting flow），而非如Betty 之「爬山流」（upslope flow），此可參見圖6(a)、(b)、(c)。此項繞山流之特徵可以圖6(c)為代表。藉圖可見：靠花蓮東方近海可分析出氣流之分流（flow splitting）現象，在分流區內屬「氣流停滯區」（stagnation zone）。此所以在中央山脈平均高度

最高與坡度最大之花蓮區一帶，風速均在5 kt以下，顯見在「氣流停滯區」中。該地氣象局與空軍測站均為無雨（圖6(c)）。藉該圖分析台東、大武一帶，風均為向山而吹，且風速甚大。因該區一帶山脈高度在1000至2000公尺之間，仍可見其有爬山現象。甚可憾者，約在1988年以前，東部均無探空觀測，無法作此項山脈上游效應（upstream effects）之進一步分析。但核驗該兩颱風，各該日之台灣全區雨量分布，可發現，雖在海岸區一帶，Dinah 颱風雨量較Betty 颱風小過一半以上（一在100mm以下，一在200mm以上），但在迎風面山區，均略相若，約均在500至600mm之間。此示低層氣流遇山有「爬山」與「繞山」之不同，但上層氣流則仍屬「爬山」，故日雨量仍均相若（參見徐晉淮所作該兩颱風日雨量分布圖，此處從略）。

(七)颱風登陸台灣北部前後地面近中心部分風場結構變化

本文四次颱風個例中有兩次颱風，即：Opal 與Bess，均為登陸台灣北部，中心所過之處之山勢高度均不及2000公尺。基本上，中心部分並未受到明顯之破壞，故藉該兩個例，頗可作颱風登陸前後中心附近風場結構變化之分析研究。

1. Bess

由圖4(a)可見Bess 颱風在台北東方近海，尚未登陸，除北部之「角隅效應」風力偏大外，一般均近標準分布，風隨半徑減小而增加，但登陸後兩小時（參見圖4(b)及圖2），風場結構已完全改觀，距中心40公里內，風力已顯著減弱（比較圖4(a)及4(b)，此並可參看圖12(a)與(b)。山脈東西兩側各測站地面風力逐時變化圖。藉圖12(a)可見，風力明顯向中心增加。其南出現有「第

一類風切線」及頗廣之「弱風尾流區」。由圖 12 (b)西部者，中心所過新竹之地正好相反，風力係向中心減弱。同時，中心出海後在其東北方出現有「第三類風切線」，並可見山脈西側均未出現「弱風尾流區」。

2 Opal

有關 Opal 颱風者，此處茲準備山脈東西兩側各測站地風力逐時變化圖，以供分析，見如圖 11 (a)與(b)。藉圖 11 (a)可見，於 8 月 5 日 15 UTC 中心登陸宜蘭時，最大風曾達 85 kt，宜蘭大於 50kt 之風吹達 7 小時。風力明顯係向颱風中心而增加。中心之南出現有「第一類風切線」，「弱風尾流區」局限於台東與大武。但二小時後 (17 UTC)，中心移至新竹時，中心風力已減至 25 kt。同 Bess 颱風，中心東側出現有「第三類風切線」。中心氣壓在宜蘭登陸時為 941.4mb，至新竹時已增至 957.9 mb，中心填塞達 16.5mb。地面風場完全轉為不對稱型式，風力最大在彭佳嶼為 85 kt (圖略)

藉該兩颱風登陸前後近中心風場結構變化比較，可見登陸時中心有顯著強風，但登陸後 2 至 3 小時，中心風力則顯著減弱，風力並轉而向外圍增加，並轉為非對稱式。配合風場，登陸後氣壓亦顯著填塞，深值注意。

四、總結

本文為對台灣區域颱風環流因中央山脈所引起主流中之「副流」(secondary flows)之分析研究。由於台灣中央山脈兩側地面觀測報告衆多，而且我們所作中尺度分析圖，時間解析度為一小時，故甚多不易分析之中小尺度流場均獲某種程度

之解析。此屬邊界層中之流場對侵台颱風邊界層流場之分析法，現仍在嘗試之中，並漸增加對此項複雜流場分析能力。我們並發現不同路徑及強度之侵台颱風，因中央山脈之衝擊，均有不同型式「副流」特徵。僅就此處經過台灣中央山脈南北兩方山勢高度在 2000 公尺以下之四次颱風所造成之中小尺度流場之分析所得，已覺收獲甚豐。特以對台灣中央山脈兩側自北向南分布各測站氣流之逐時變化分析，而使甚多「副流」現象無所遁形。此處四例颱風，諸如各式邊界流之流動、各式尾流、各式不同邊界流流型間輻合線—風切線、颱風旋流之遇山阻擋及偏向作用等，此處均獲明顯之例證。而使侵台颱風受中央山脈對其影響之了解，得以更進一步。此項研究方法，已顯示對侵台颱風地形影響之了解及風力特性之了解與預測，提供坦途。

五、致謝

本研究為「侵台颱風預報專家系統建立研究計畫工作的一部分」，蒙兩位助理鍾孝林先生、婁淑榮先生密切配合，及李金蓮小姐、吳春花小姐填製各種附圖，均所銘感，謹此致謝。

參考文獻

- 王時鼎，1954：颱風時橫越台灣中央山脈之研究。中國空軍天氣分析月刊，4卷10期。
- 王時鼎，1963：沿台灣中央山脈前進颱風之地形影響研究。氣象預報與分析。第十四期。
- 王時鼎，1989：侵台颱風風場特性及各地陣風預報研究。防災科技研究報告 77—58 號。
- 王時鼎，1991：侵台颱風強度變化之分析與定量預報。防災科技研究報告 78—85 號。
- 王時鼎，1991 (a)：侵台颱風運動及風場變化進一

- 步研究。天氣分析與預報研討會。台北，177-194。
- 曲克恭，1976：台灣地形與颱風環流之分析研究。氣象預報與分析，第六十八期。
- 曲克恭，1977：中央山脈對颱風影響之分析研究。氣象預報與分析，第七十二期。
- Bender, M., R. Tuleya and Y. Kurinara, 1987: A numerical study of the effect of island terrain on tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 130-155.
- Brand, S., and J. W. Belloch, 1974: Changes in the characteristics of typhoons crossing the island of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.* 102, 708-714.
- Chang, C.-P., T.C. Yen., and J.M. Chen, 1991: Effects of terrain on the surface structure of typhoons over Taiwan. *International Conference on Mesoscale Meteorology and TAMEX. Taipei, Taiwan*, 350-358.
- Chang, S.W. 1982: The orographic effects induced by an island range on propagating tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 110-1225-1270.
- Isnijima, s., and M. Estoque 1987: An observational study of orographic study on westbound typhoons crossing Taiwan. *J Meteor, Soc. of Japan*, 65 455-467.
- Wang, S.T., 1980: Prediction of the behavior and strength of typhoons in Taiwan and its vicinity (in Chinese). *Res. Rep. Np.108, Central Weather Bureau. (Available from the Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan.)*
- Wang, S.T., 1991(b): Observational study on the mesoscale flow structures of typhoons encountering the Taiwan terrain. *International Conference on Mesoscale Meteorology and TAMEX. Taipei, Taiwan, 1991. 330-341.*
- Yeh, T.C., and R.L. Elsberry, 1991: Upstream typhoon track deflections caused by the Taiwan orography. *International Conference on Mesoscale Meteorology and TAMEX. Taipei, Taiwan. 342-349.*

An Analysis of the Secondary Flows in the Typhoon Circulation

Introduced by the Central Mountain Range in Taiwan

Shih-Ting Wang Ching-Yen Tsai Ming-Sen Lin

Central Weather Bureau

ABSTRACT

In order to study the secondary flows associated with the typhoons in Taiwan, the four cases of typhoons, i.e., Opal in 1962, Bess in 1971, Dinah in 1962 and Betty in 1972, are selected for detail analysis. The results obtained are as follows:

(1) There are three categories of shear lines occurred and caused namely by: the interaction of flows between the typhoon circulation and the returning flow around the Central Mountain Range (CMR), flows between the typhoon and the open channel flow (OCF) in the Taiwan Strait, and the typhoon flows merged from the east and west sides of the CMR in the sea northwest of Taiwan.

(2) Three kinds of the boundary layer flows can be identified. These are caused by the pure friction, the blocking, and the flow separation, respectively.

(3) A large wake zone occurred in the west side of the CMR caused by the sheltering effect when typhoon passed the south portion of the CMR and moved into the southern Taiwan Strait. In addition, a meso vortex was developed in such kind of the wake zone for Typhoon Dinah.

Additionally, the flow splitting with a typical stagnation zone on the windward side of the CMR was also noticed from Typhoon Dinah. The downslope flow causing the Föhn effect was found from Typhoon Bess, and the abrupt change of the wind structure in the typhoon core before and after the landfall was demonstrated from Typhoon Opal.

All these typhoon secondary flow features were vividly depicted from the surface wind analysis by the time cross sections of the stations along the east and west sides of the CMR.

圖 1 台灣地形及中央山脈縱剖面圖。

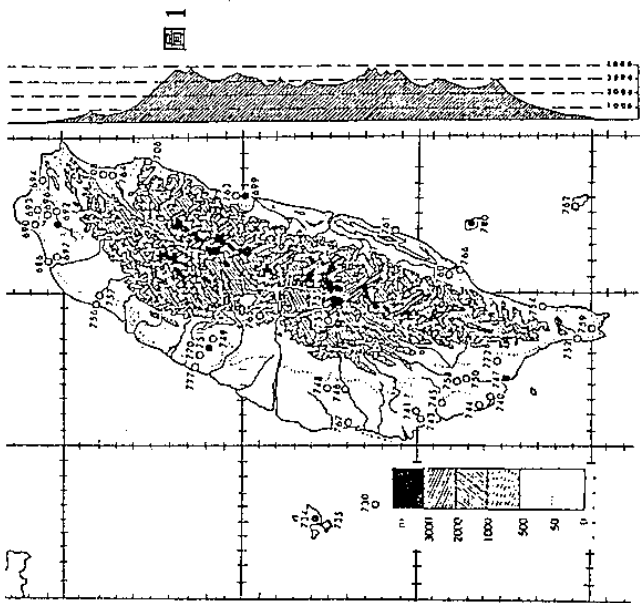
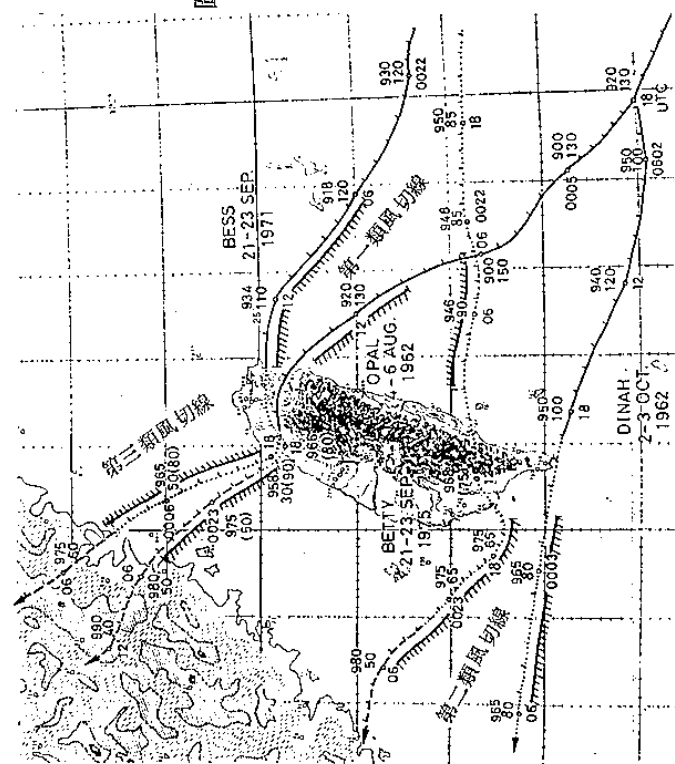
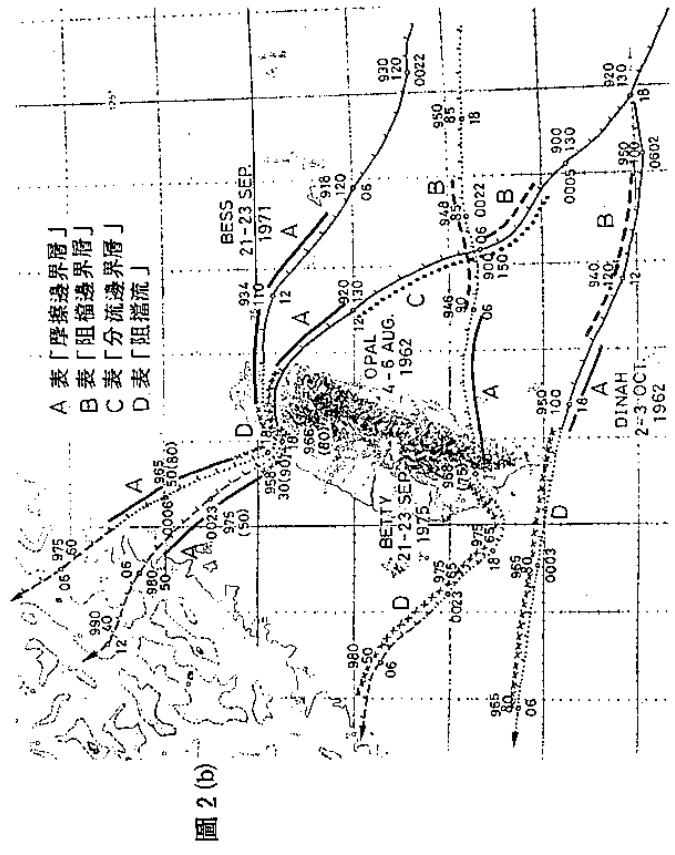


圖 2(a) 本文中所述論之四次颱風逐時路徑圖，圖中並附每六小時之中心最低氣壓 (mb)，最大風速 (kt)。路徑實線部分表強烈颱風 (≥ 100 kt)，點線表中度颱風 (64-99 kt)，斷線表輕度颱風 (34-63 kt)。圖中 1971 年 9 月 Bess 與 1962 年 8 月 Opal 經過台灣北部。1975 年 9 月 Betty 經過台灣南部，1962 年 10 月 Dinah 經過台灣南端。圖中附有細斜線之颱風路徑部分，表在該時間分別出現有第一類風切線、第二類風切線、與第三類風切線。

圖 2(b) 1971 年 Bess，1962 年 Opal，1975 年 Betty，及 1962 年 Dinah 颱風於台灣中央山脈兩側，出現各類邊界流時之各颱風中心所在位置圖。“A”表「摩擦邊界層」，“B”表「阻檔邊界層」，“C”表「分流邊界層」，“D”表「阻擋流」情況，其出現為當氣流進入角 (α 角) $\geq 70^\circ$ 之時。



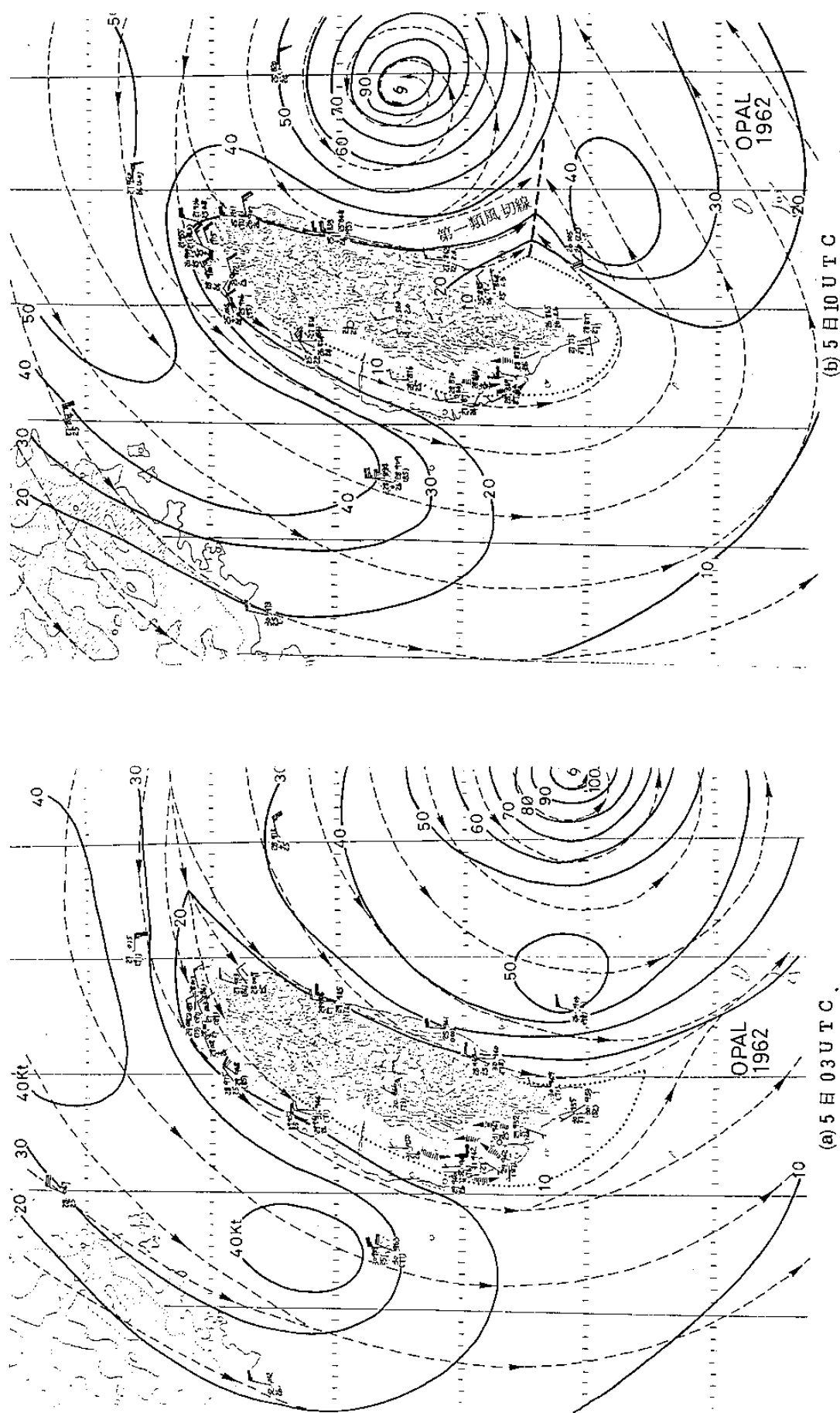
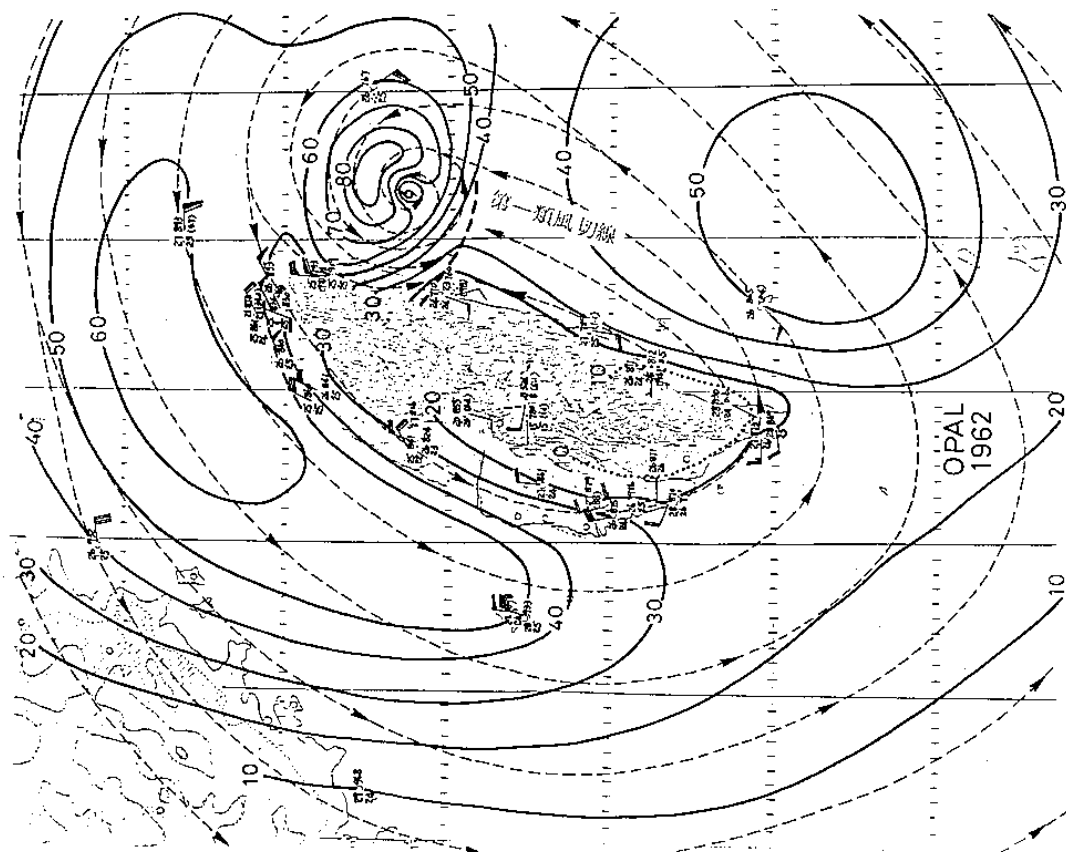
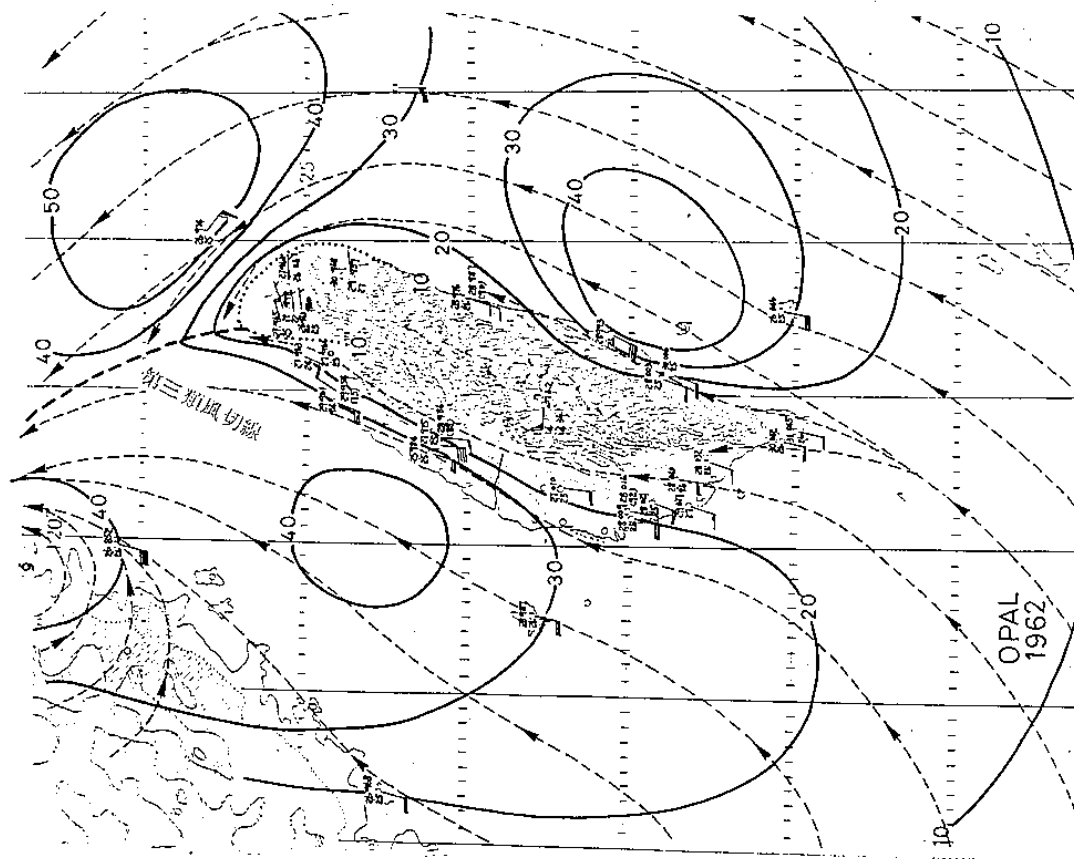


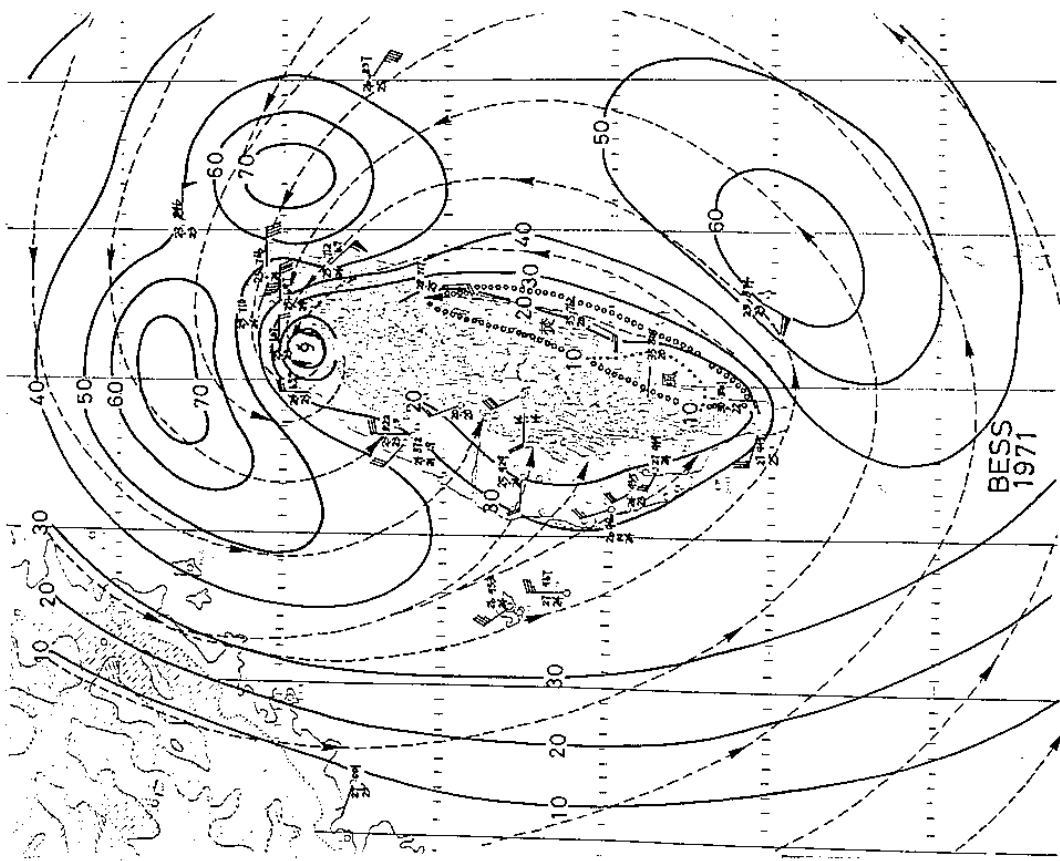
圖3 1962年8月5-6日Opal 颱風，因中央山脈影響下，在不同階段之地面流場圖。(a)5日03UTC, (b)5日10UTC, (c)5日13UTC, (d)6日04UTC。圖中實線為等風速線(kt)，斷線為氣流線。點線為「自由氣流速度」(free-stream velocity)線。在其內為「弱風尾流區」(wake zone)，或「氣流停滯區」(stagnation zone)，粗斷線表「風切線」(shear line)。圖中並附各測站資料，含風向、風速(一直桿代表10kt, 半桿代表5kt, 三角形50kt)、溫度、露點(°C)、氣壓(mb)及天氣現象。



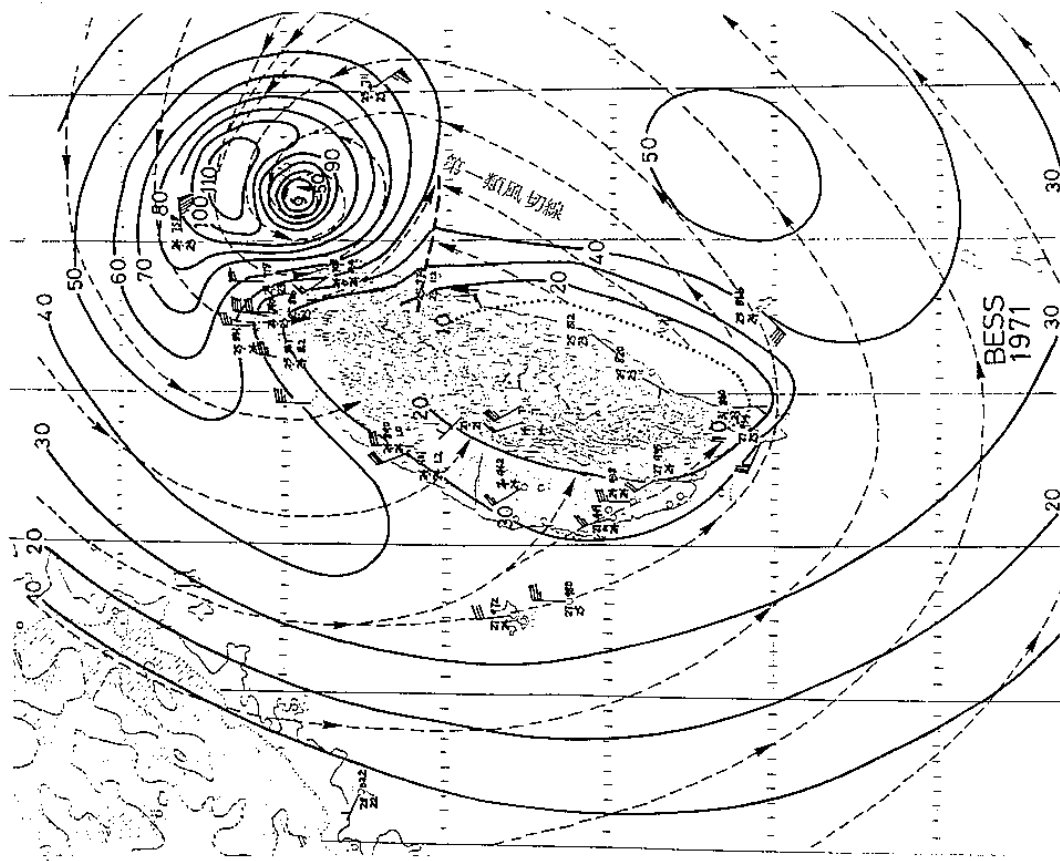
續圖 3 (c) 5H13UTC



(d) 6H04UTC

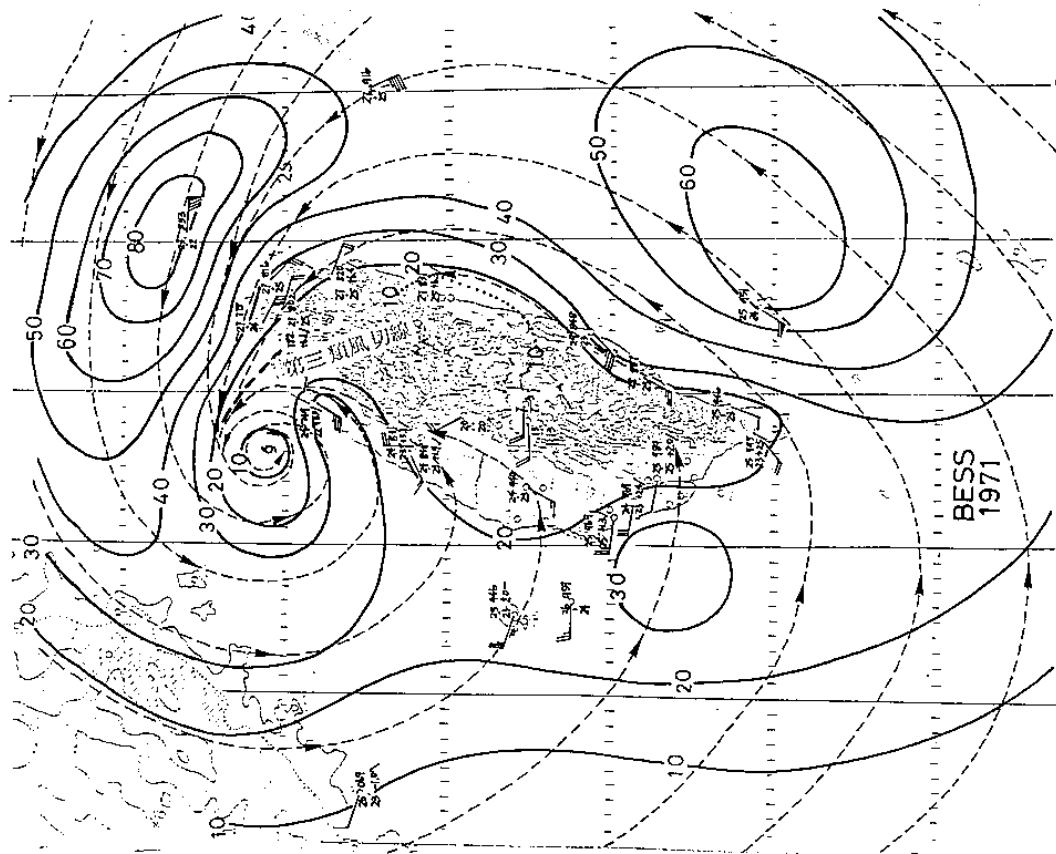


(a) 22日13 UTC

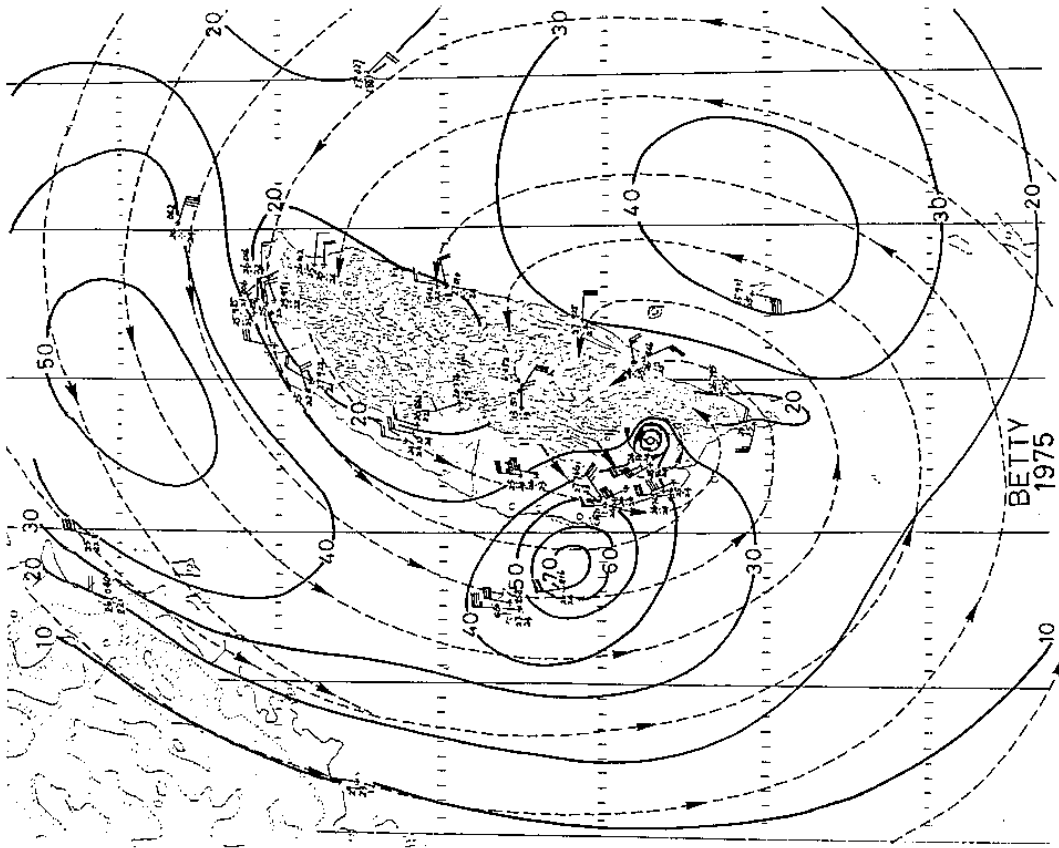


(b) 22日16 UTC

圖 4 1971 年 9 月 22 日 Bess 颱風在不同階段之地面流場圖。(a)13 UTC, (b)16 UTC, (c)21 UTC。說明同圖 3。

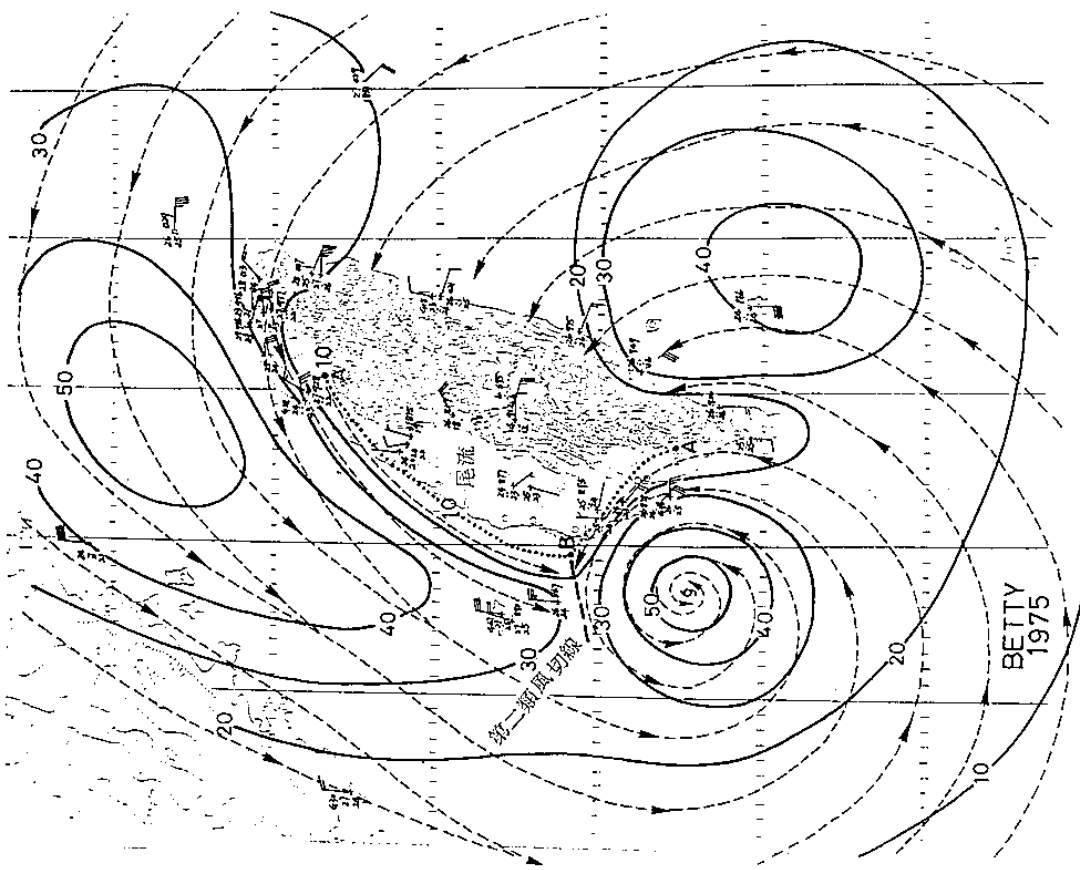


續圖 4 (c) 22日21UTC

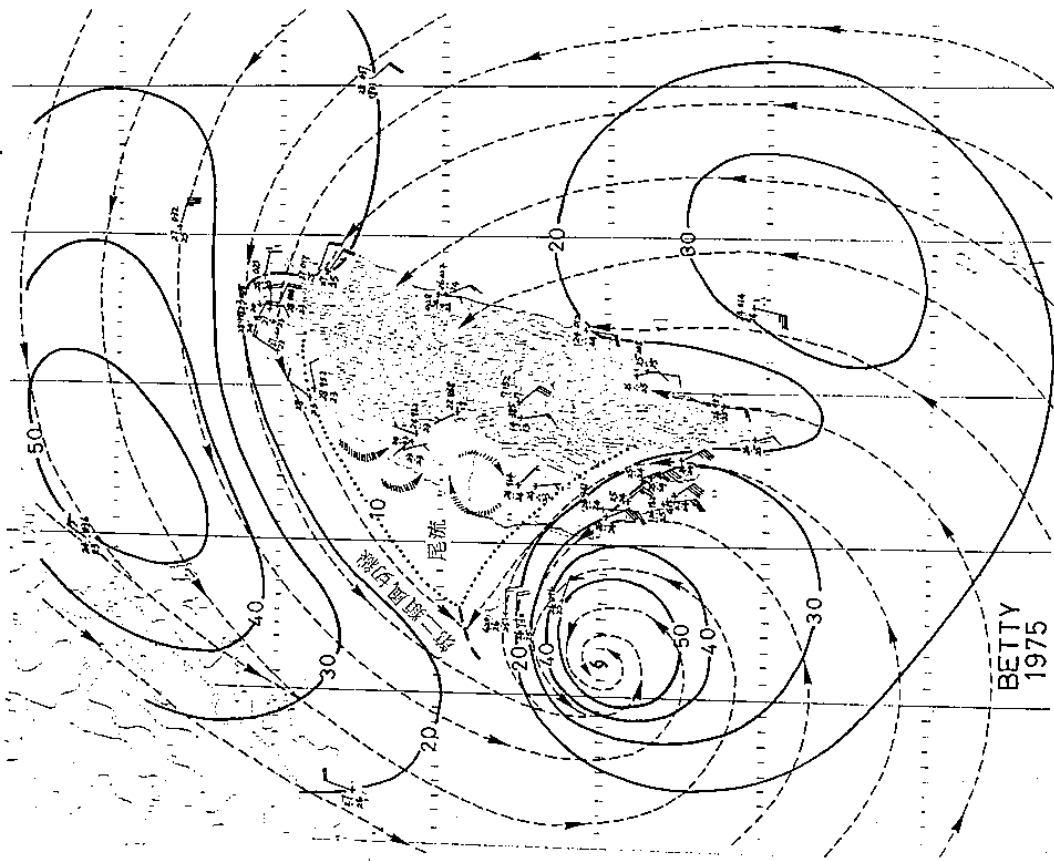


(a) 22日12UTC

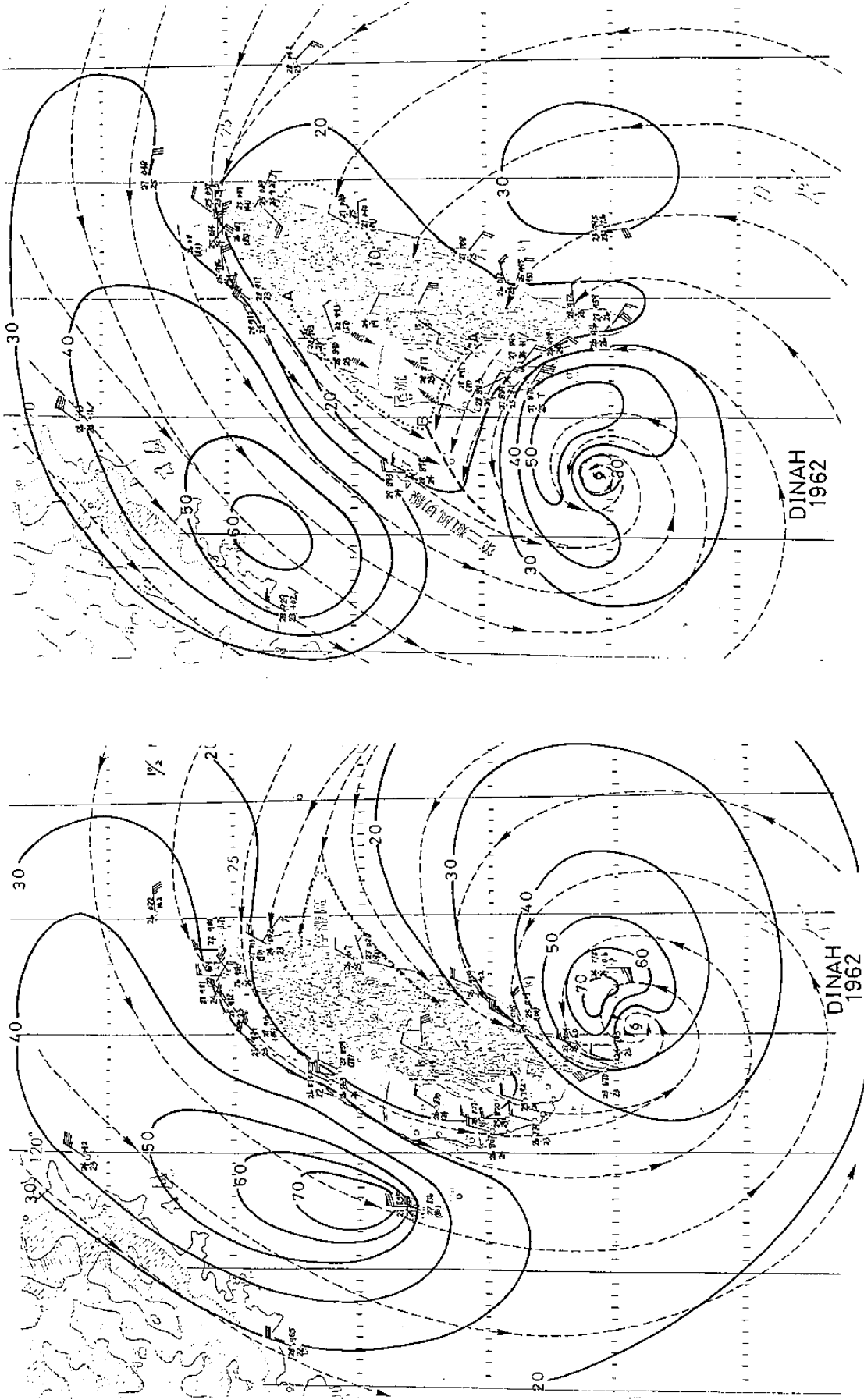
圖 5 1975年9月22日-23日Betty 颱風在不同階段之地面流場圖。
(a) 22日12UTC, (b) 22日18UTC, (c) 23日00UTC。說明同圖3。



(b) 22H 18 UTC



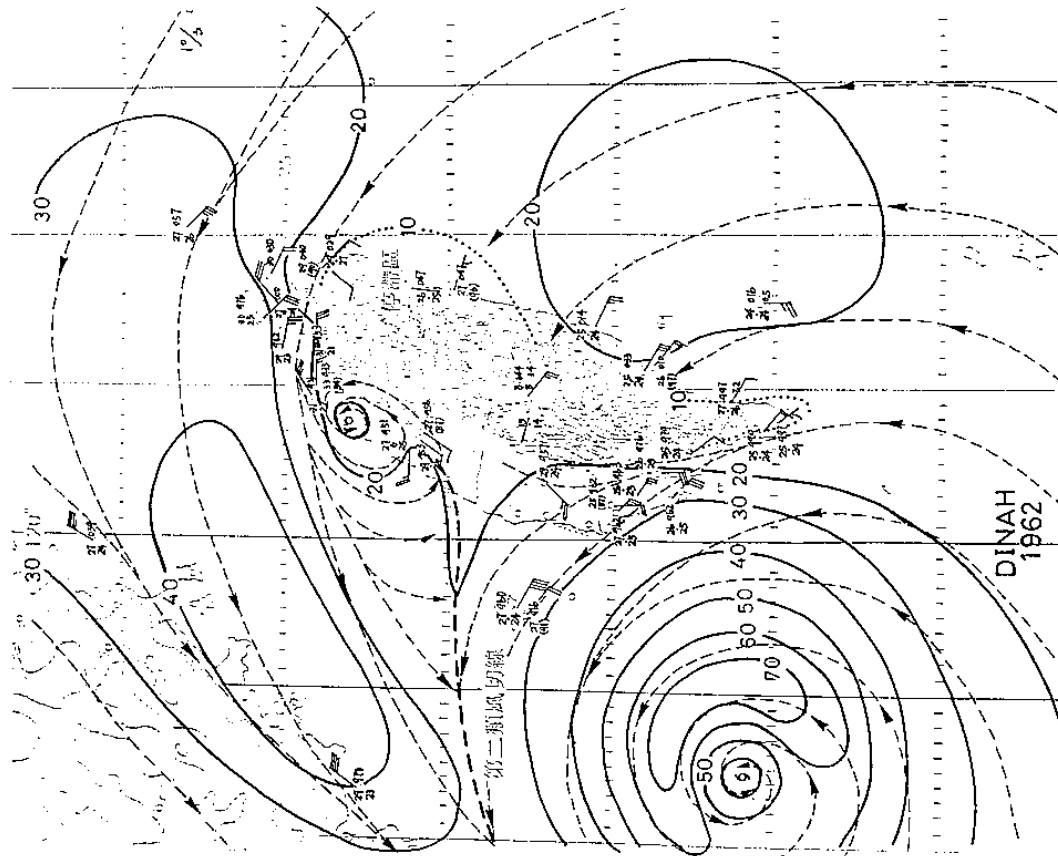
(c) 23H 00 UTC



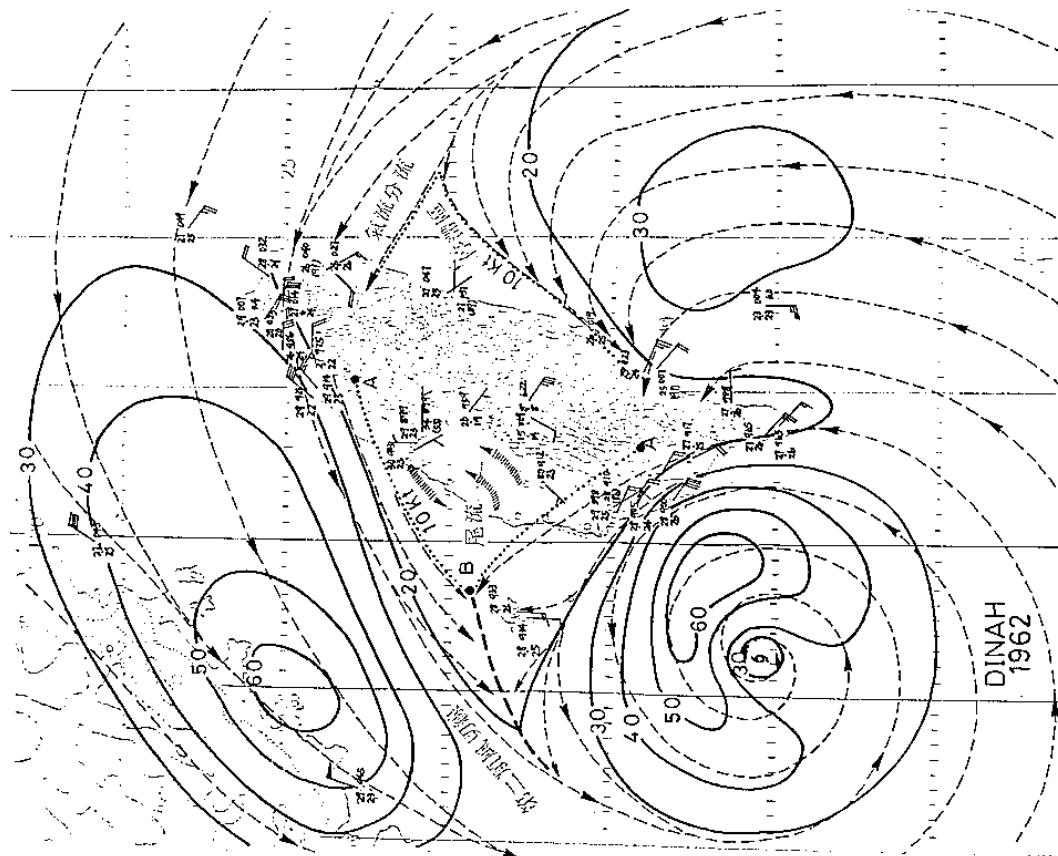
(a) 2日19 UTC

(b) 3日00 UTC

圖6 1962年10月2—3日Dinahh颱風在不同階段之地面流場圖。(a)2日19 UTC, (b)3日00 UTC, (c)3日01 UTC, (d)3日04 UTC。說明同圖。

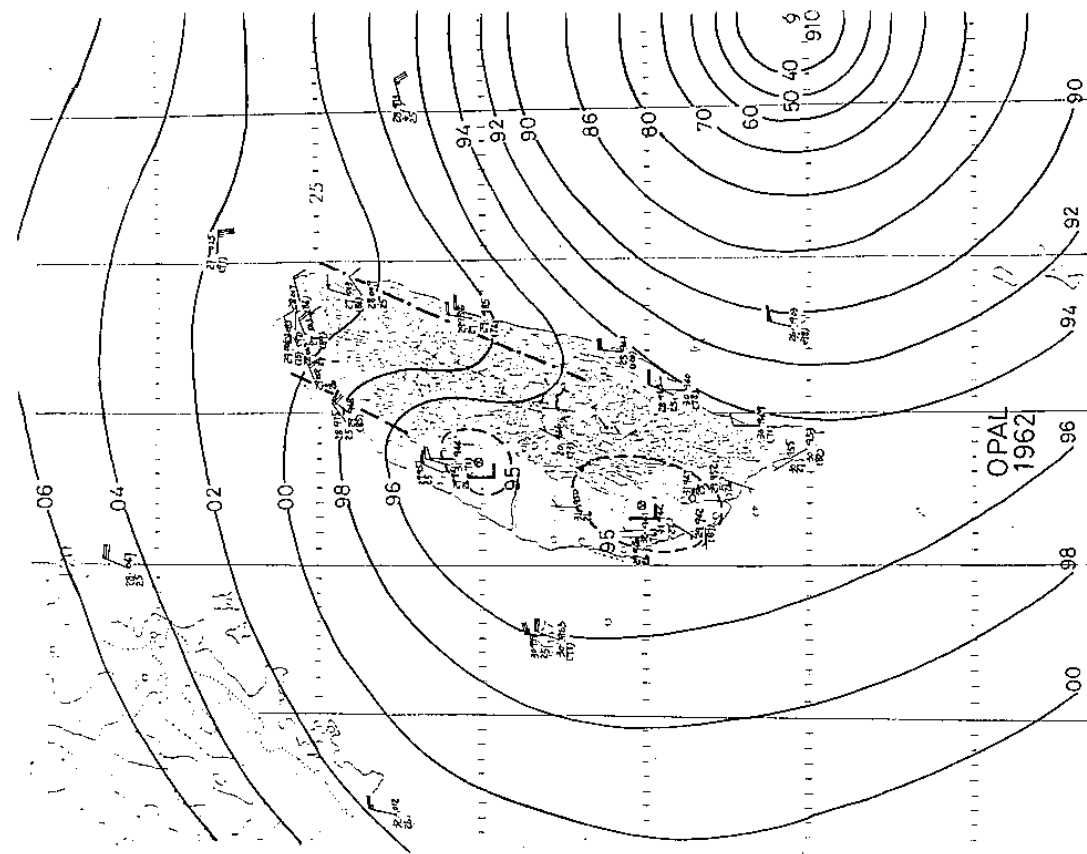


(d) 3日 04 UTC

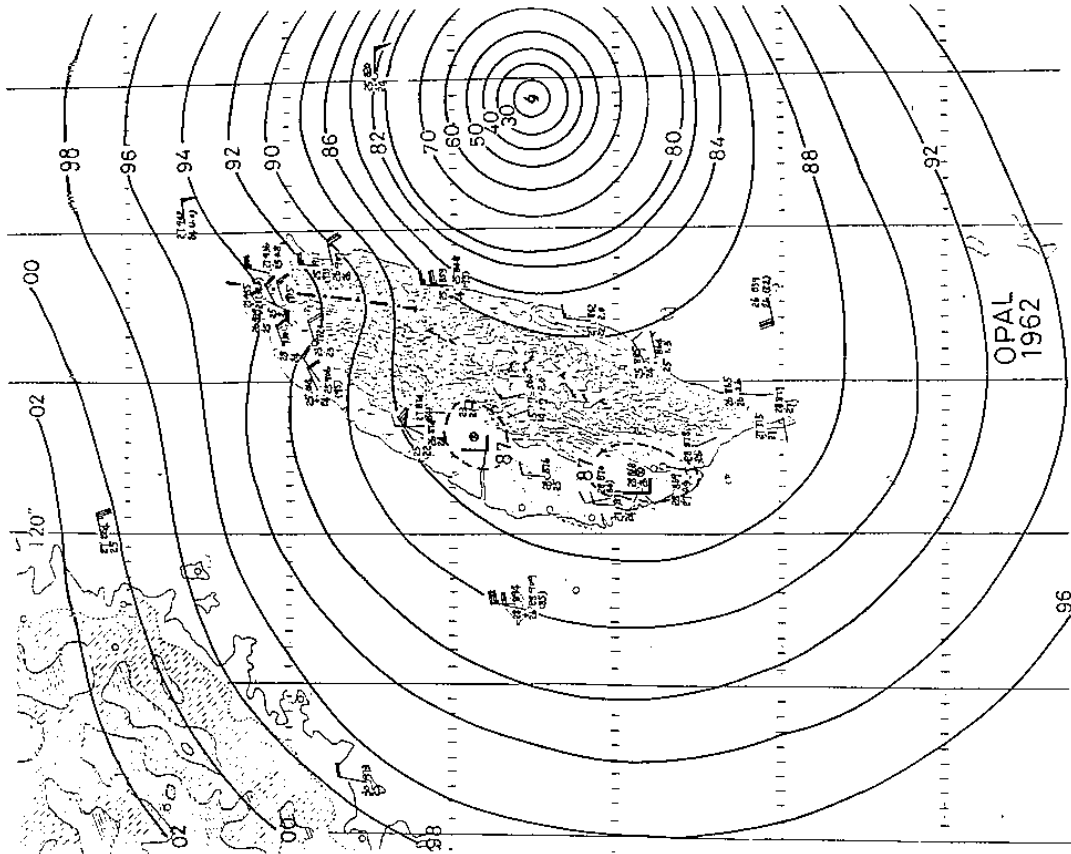


(c) 3日 01 UTC

續圖 6



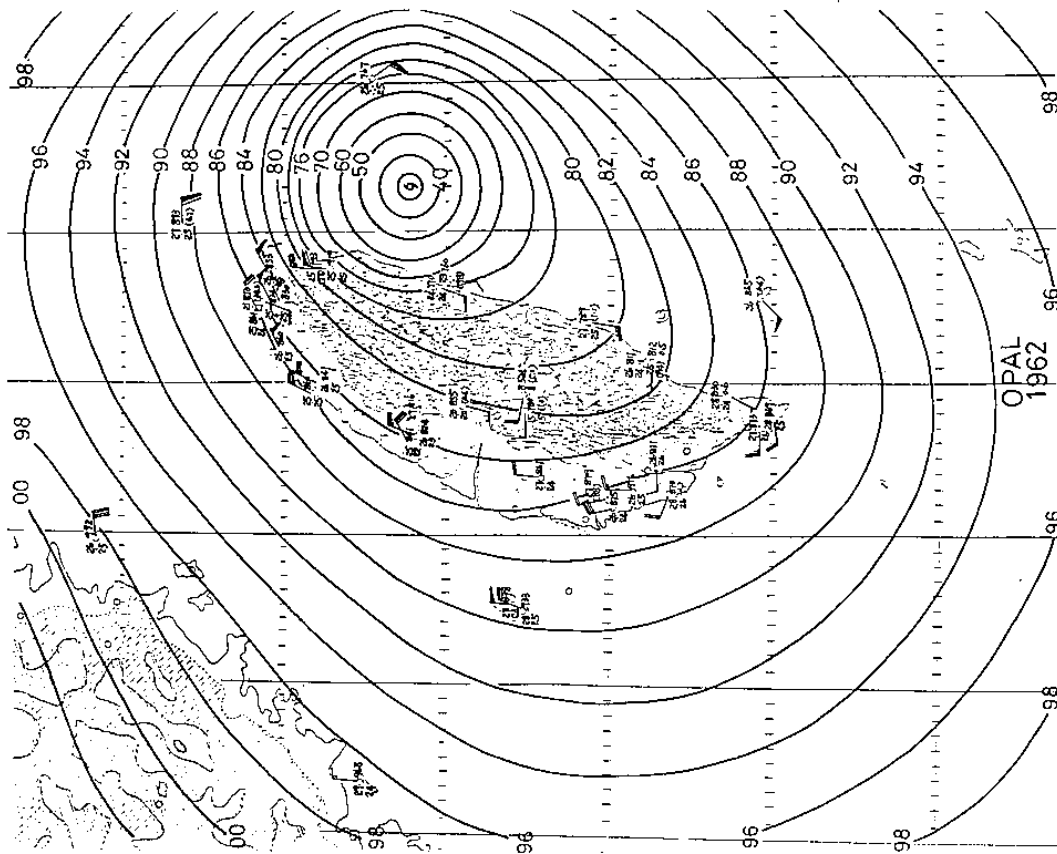
(a) 5日03 UTC



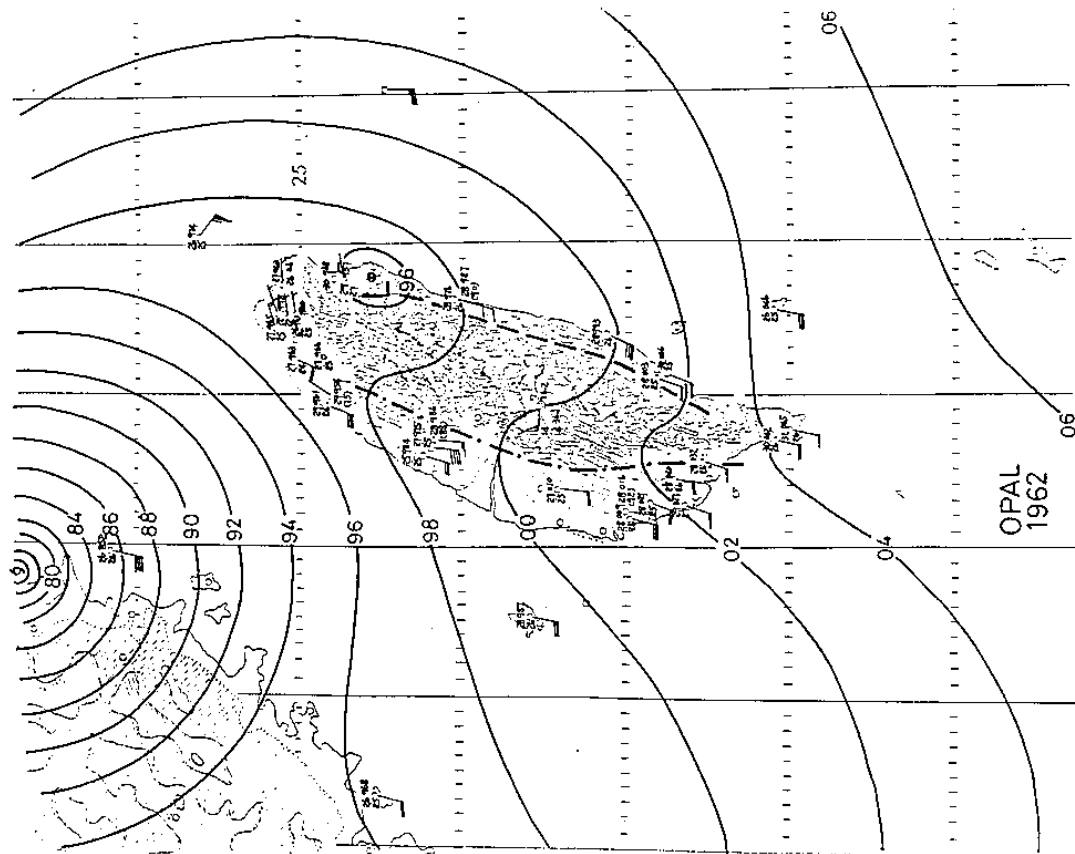
(b) 5日10 UTC

圖7 1962年8月5-6日Opal 颱風過境時，配合流場在不同階段之地面等壓線圖。

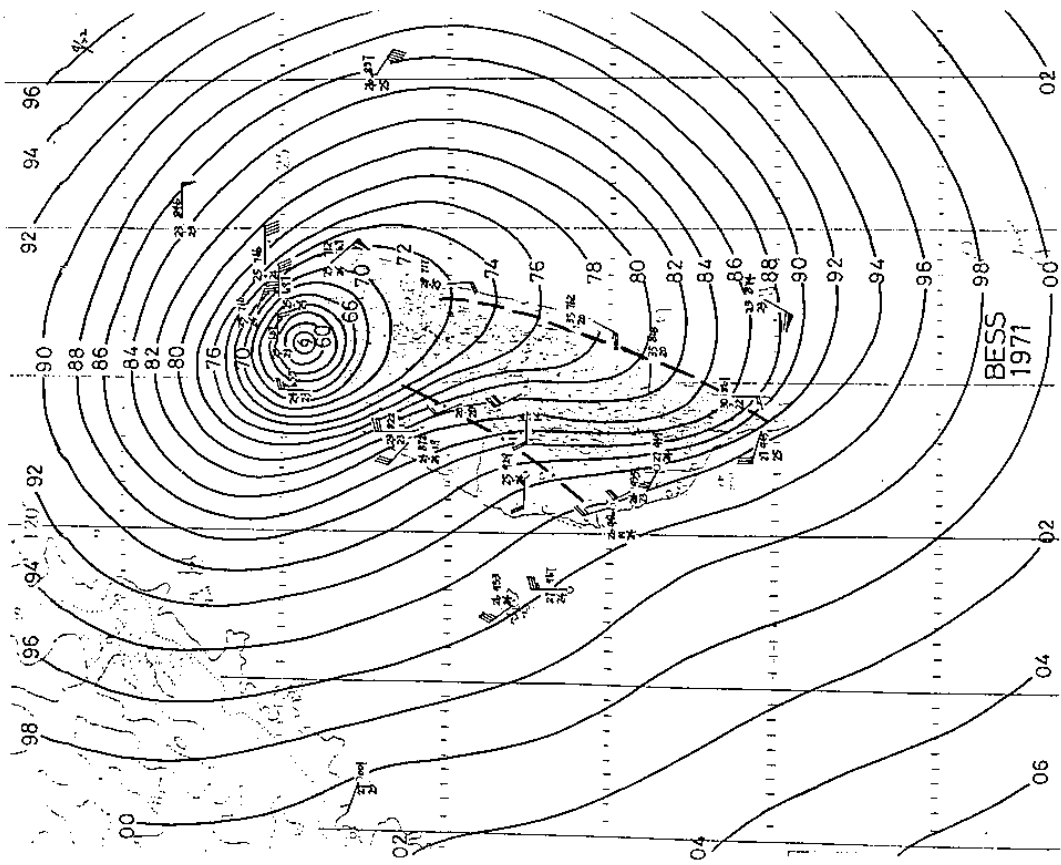
(a) 5日03 UTC, (b) 5日10 UTC, (c) 5日13 UTC, (d) 6日04 UTC。圖中等壓線間隔為2 mb，虛線者為1 mb。由圖，配合邊界流之特徵，分別可見迎風脊（斷點線）、背風槽（斷線）、副低壓、副環流中心（即低壓區已有明顯氣旋式環流者）。注意「弱風尾流區」均屬背風面之弱氣壓梯度區。



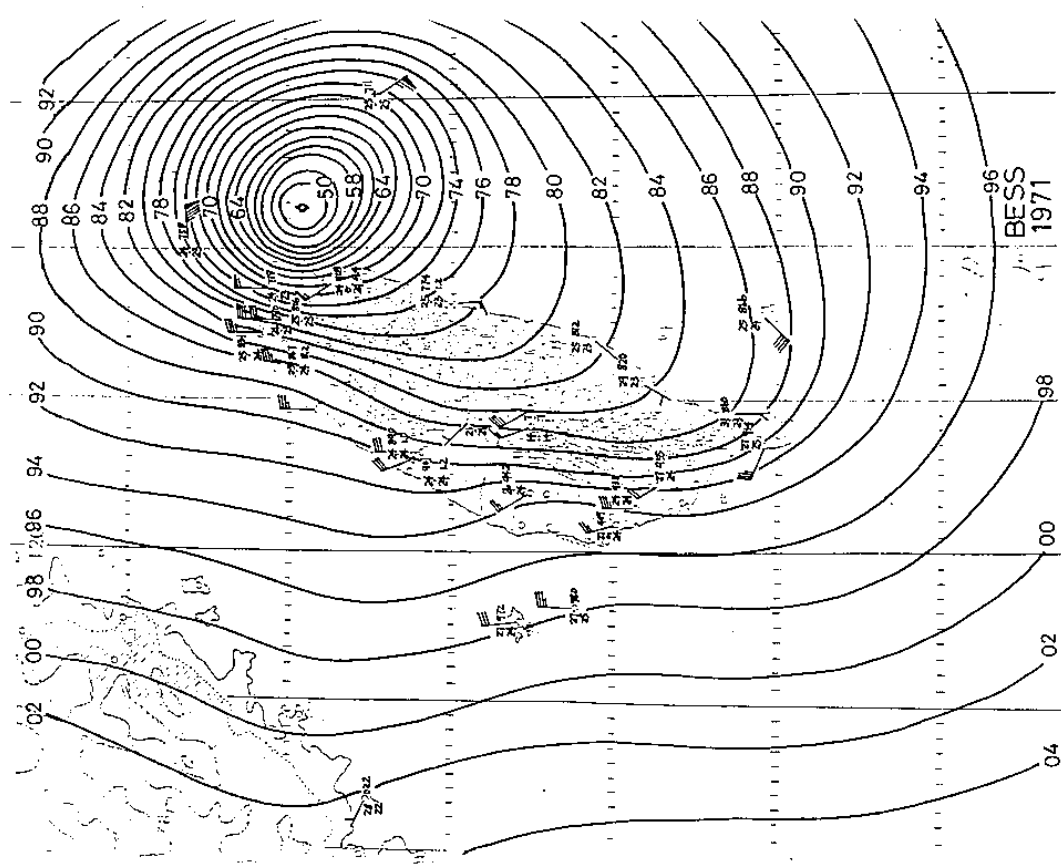
(c) 5 H 13 U T C



(d) 6 H 0 4 U T C

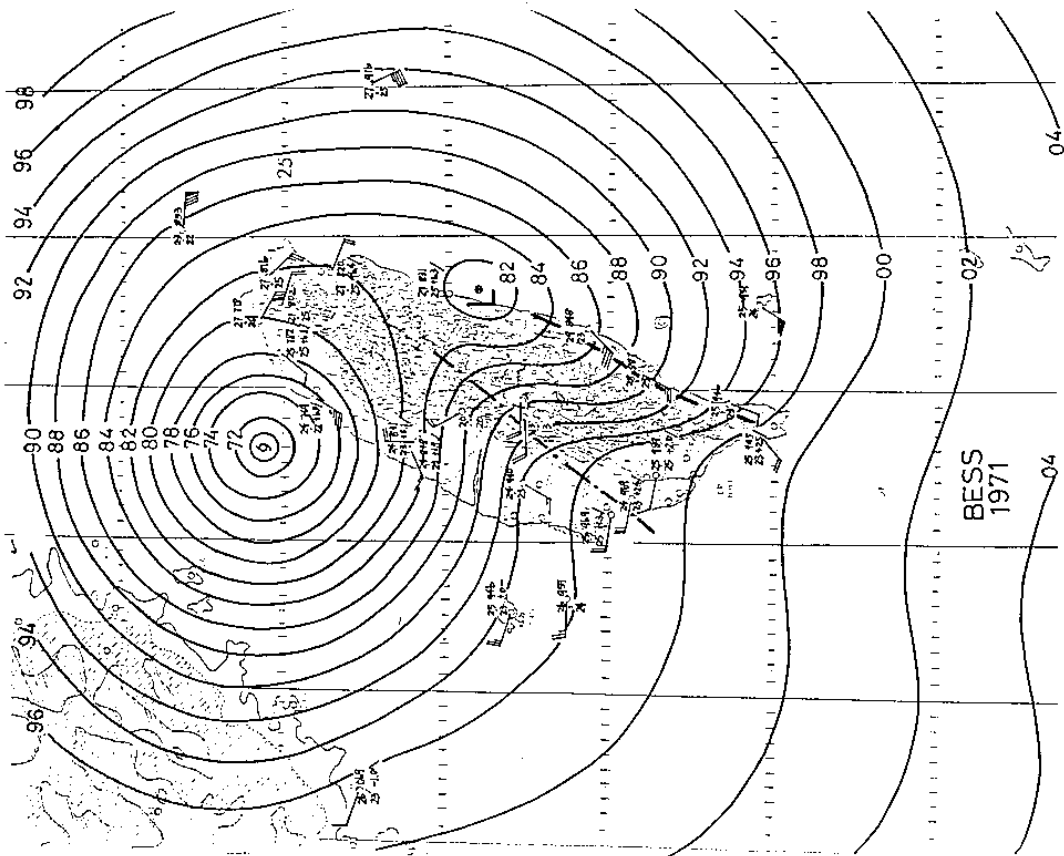


(a) 22日13 UTC

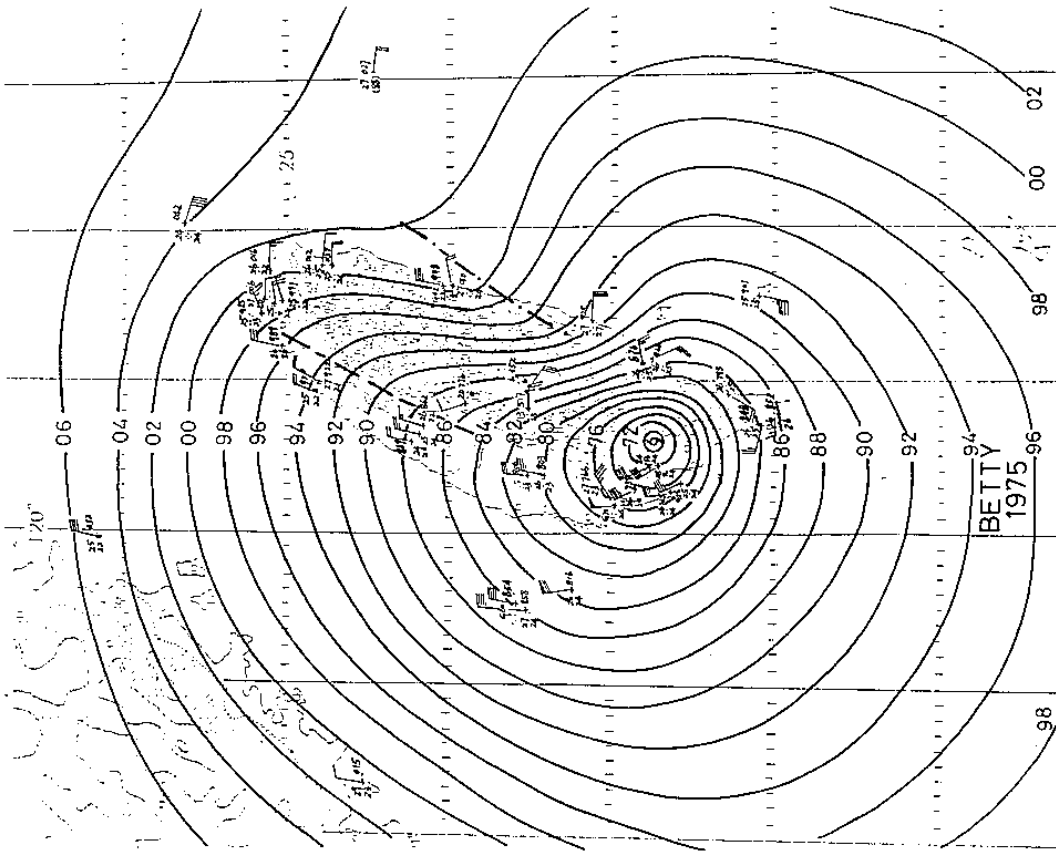


(b) 22日16 UTC

圖8 1971年9月22日Bess 颱風過境時，在不同階段之地面等壓線圖。(a)13 UTC, (b)16 UTC, (c)21 UTC。說明同圖7。

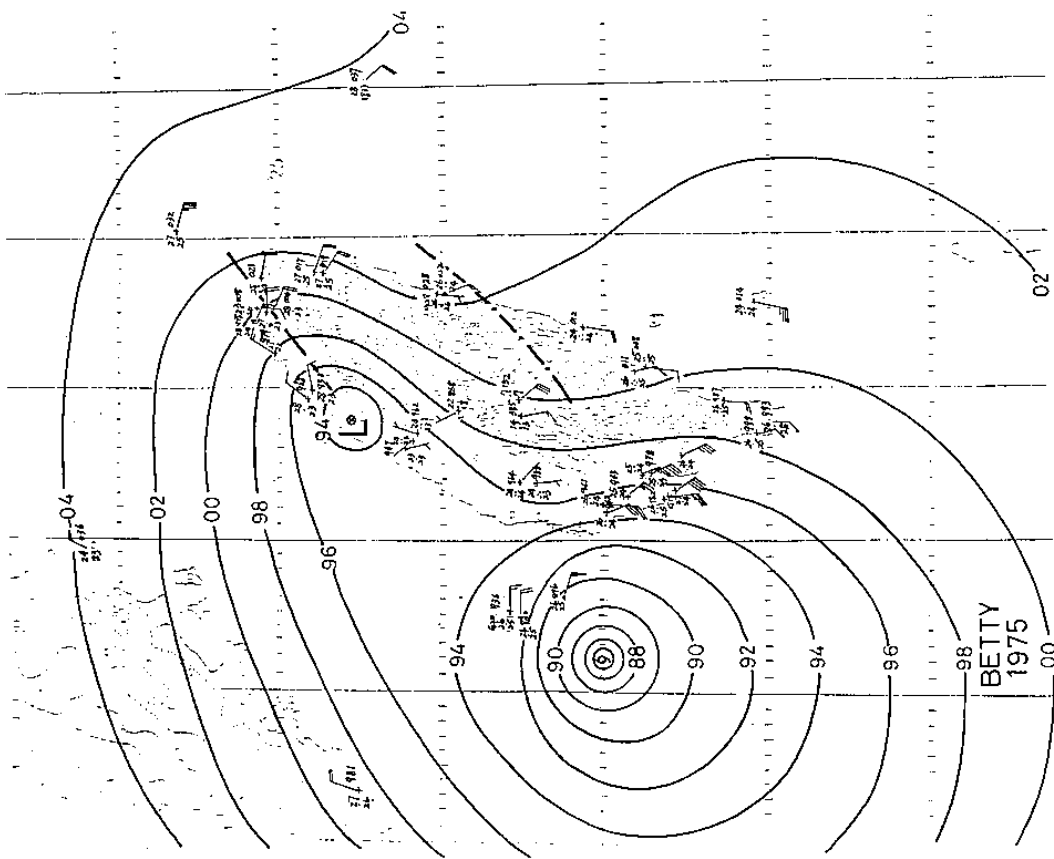


續圖 8 (c) 22日 21U T C

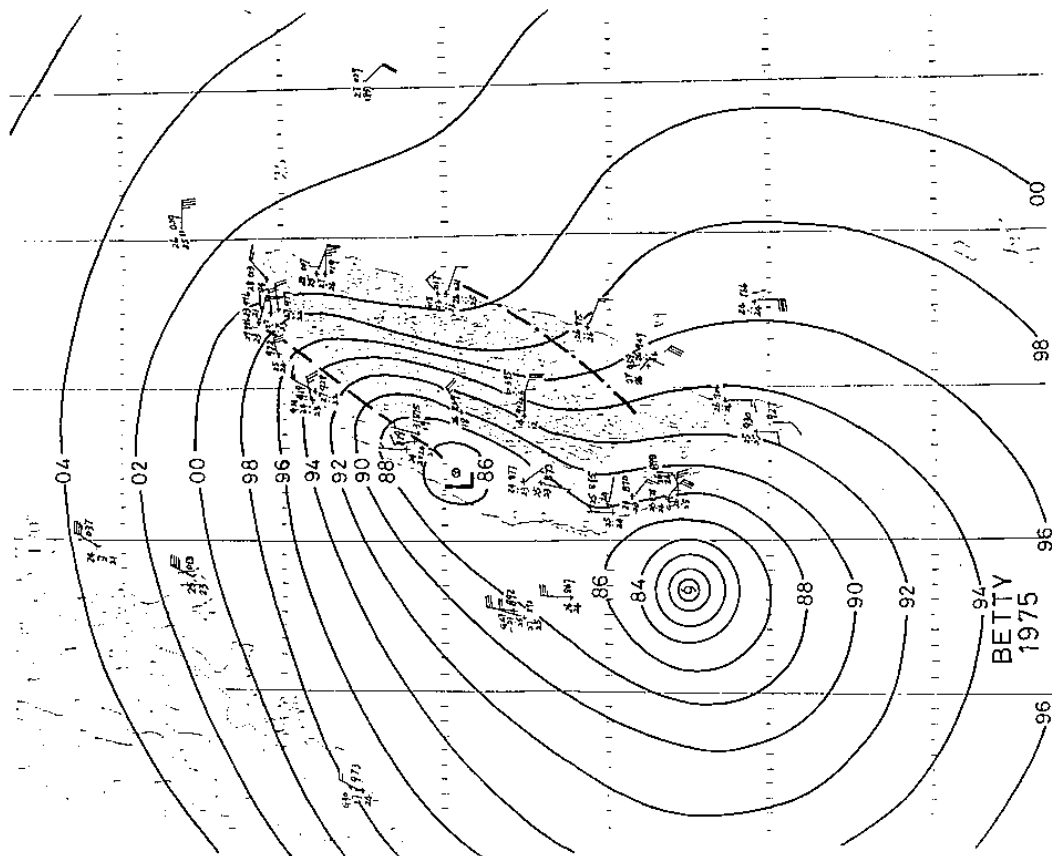


(a) 22日 12U T C

圖 9 1975 年 9 月 22—23 日 Betty 颱風侵台時，在不同階段之地面等壓線圖。
(a) 22日 12 U T C , (b) 22日 18 U T C , (c) 23日 00 U T C 。說明同圖 7。

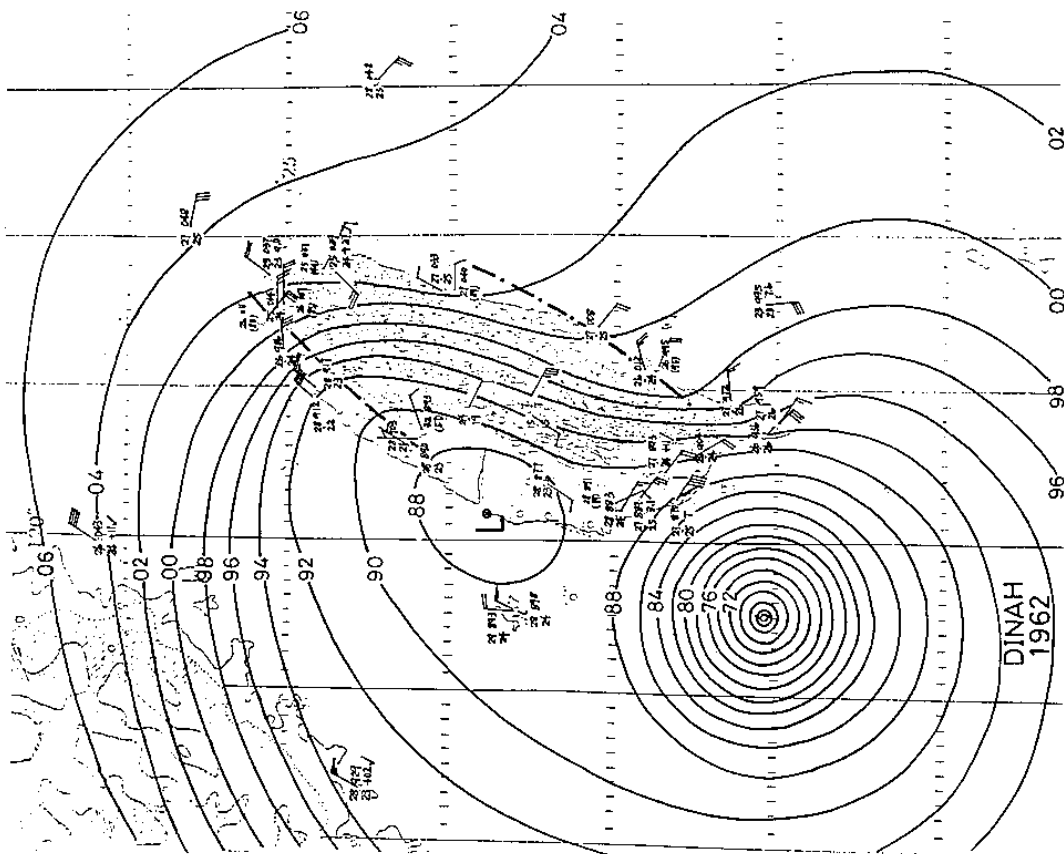


(c) 23 H 00 U T C

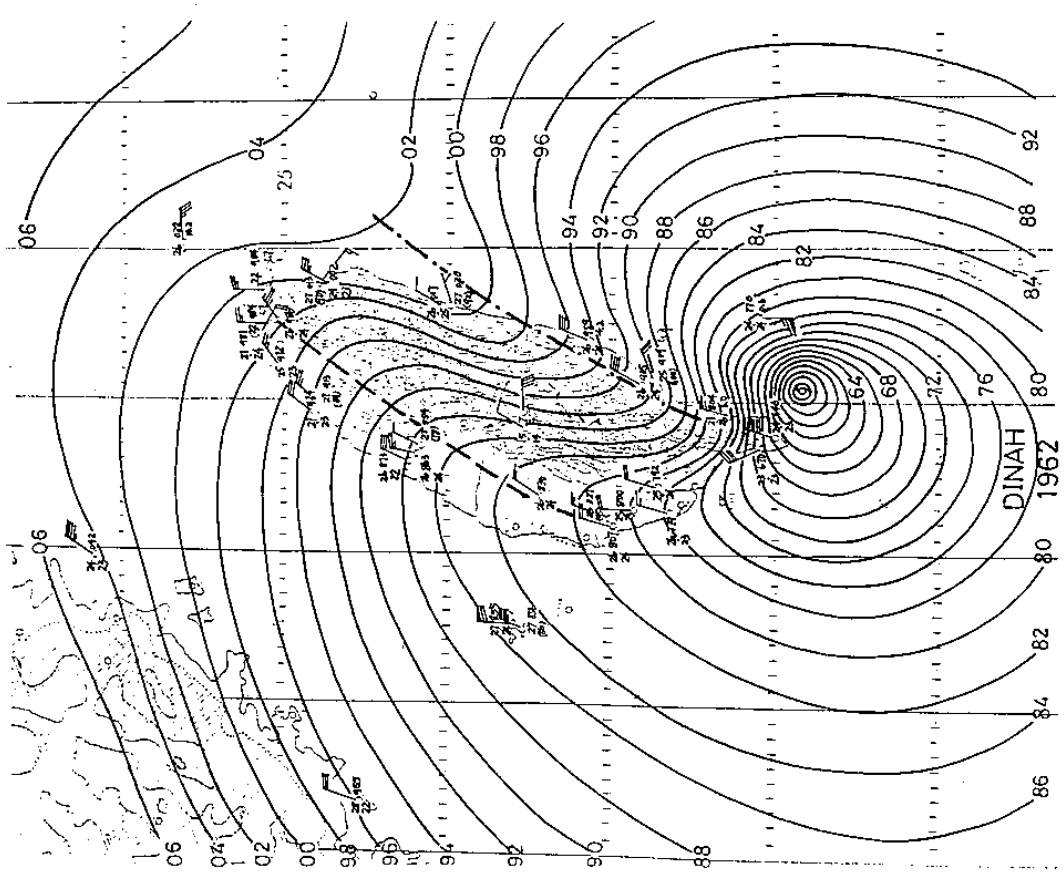


(b) 22 H 18 U T C

續圖 9



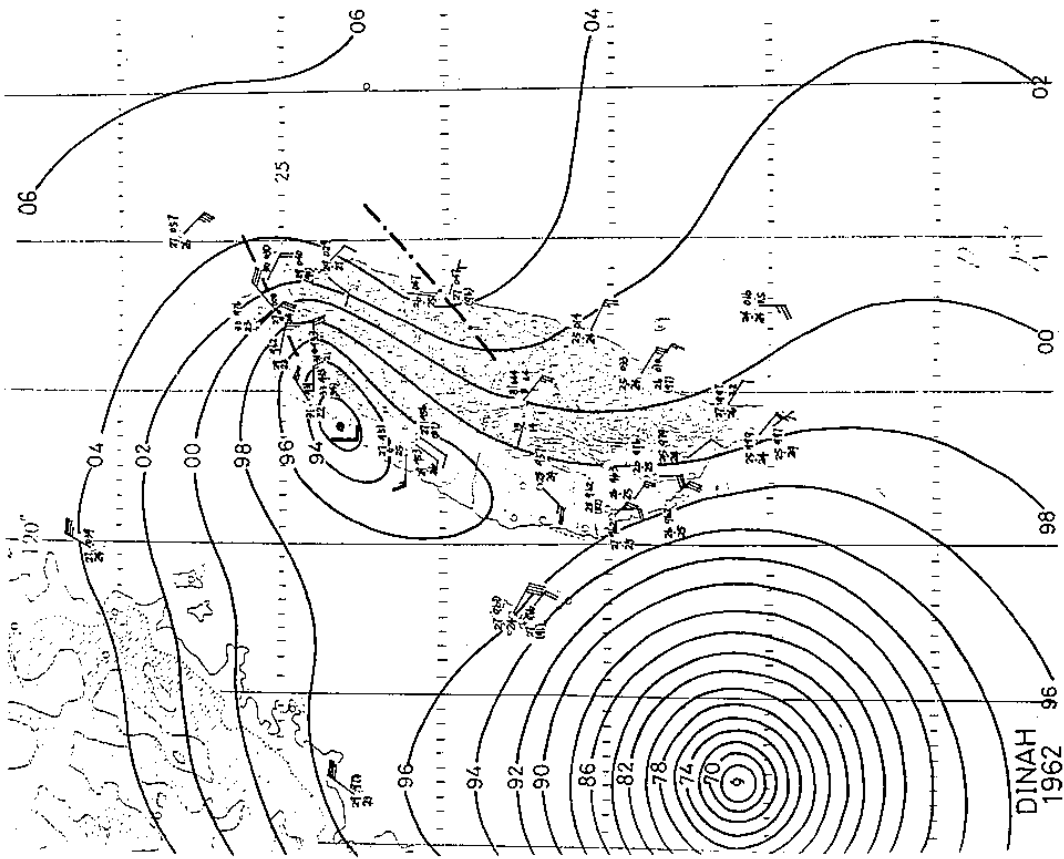
(a) 2日 02 UTC



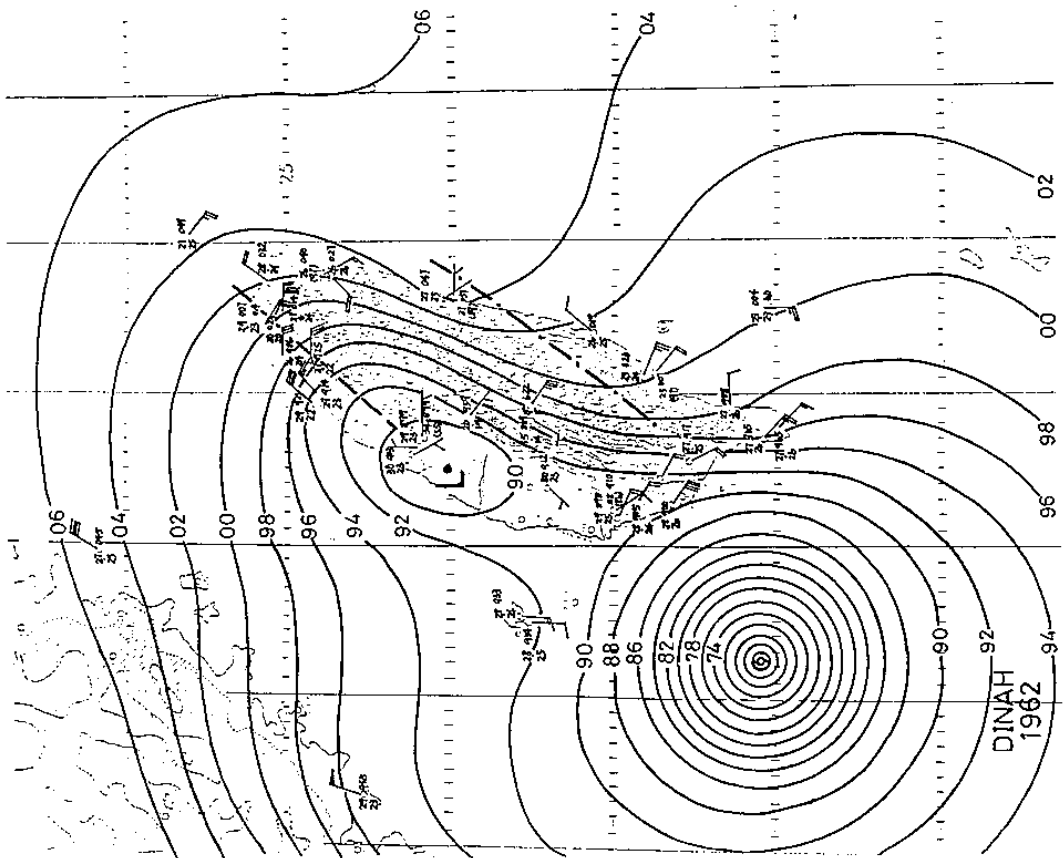
(b) 3日 03 UTC

圖10 1962年10月2-3日Dinah颱風侵台時，在不同階段之地面等壓線圖。(a)2日19UTC，(b)3日00UTC，(c)3日01UTC，(d)3日04UTC。圖(d)中副低壓已發展成副環流中心（在新竹附近）。

其他說明見圖7。



(d) 3 H 04 U T C



(c) 3 H 01 U T C

接圖 10

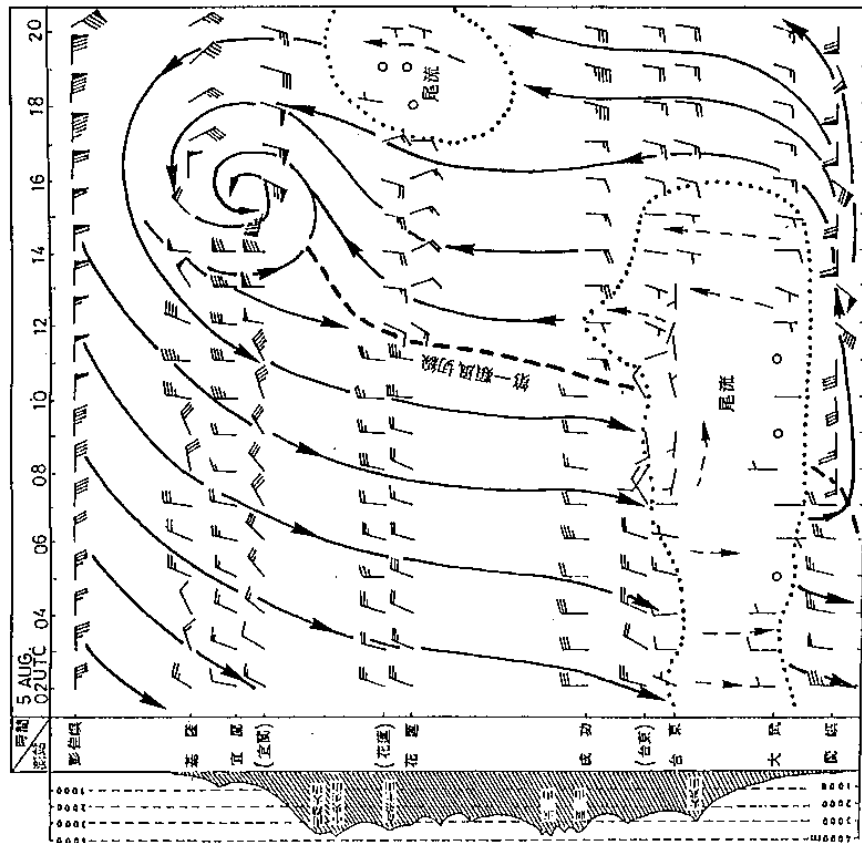


圖11(a) 1962年8月02 UTC 颱風侵台於5日02 UTC至20 UTC 期間，台灣中央山脈東側自北至南，各測站地面風逐時變化分析（其路徑圖參見圖2）。圖中附有箭頭實線為氣流線，粗斷線為山脈造成「副流」(secondary flow) 特徵之一之「風切線」(shear line)。粗點線為「弱風尾流區」(wake zone) 及「氣流停滯區」(stagnation zone)。
粗點線區內附箭頭之細斷線表各「副流」區內之流線。

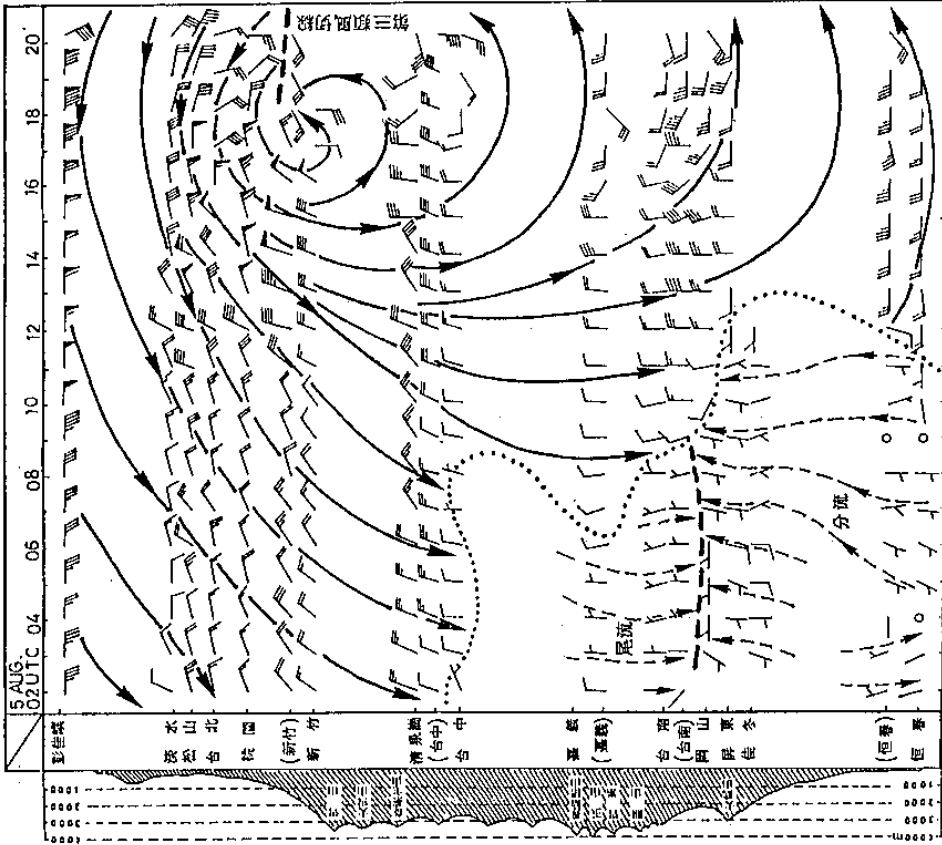


圖11(b) 同圖(a)，但為中央山脈西側者。說明同圖(a)。

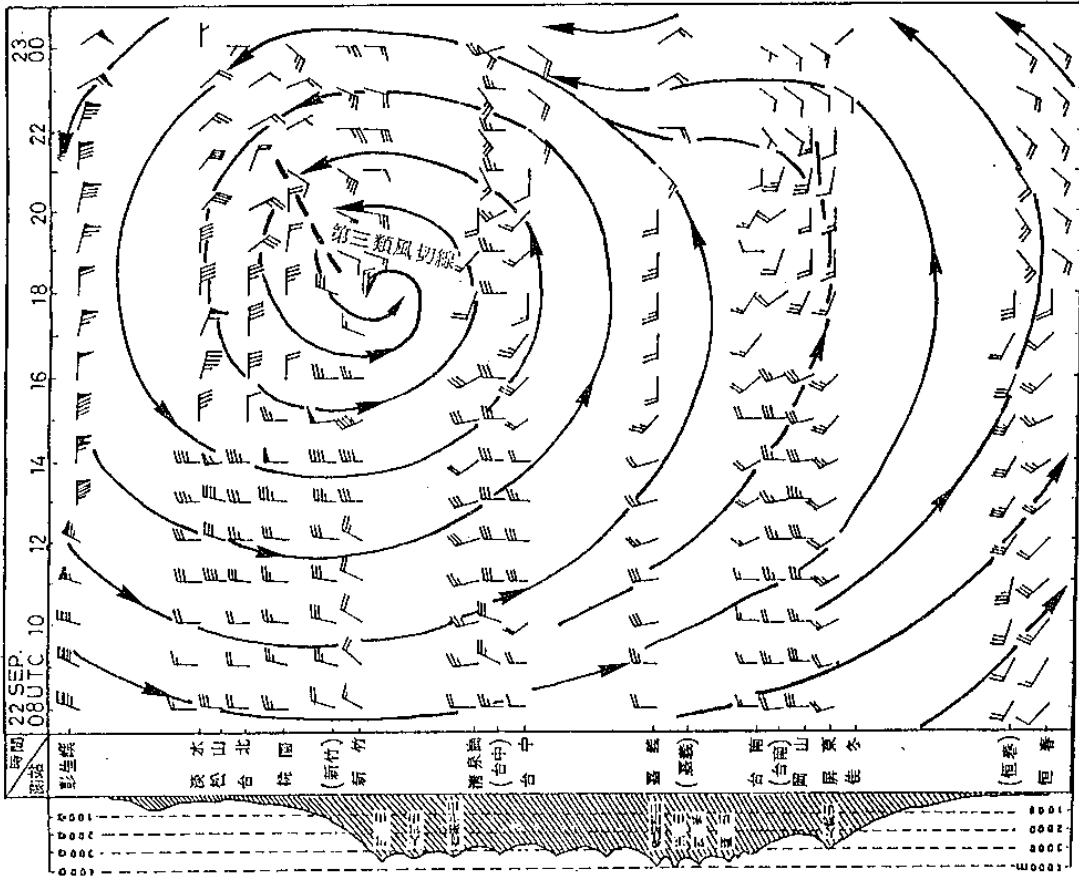


圖12(a) 同圖(b)，但為中央山脈西側者。說明同圖11 a

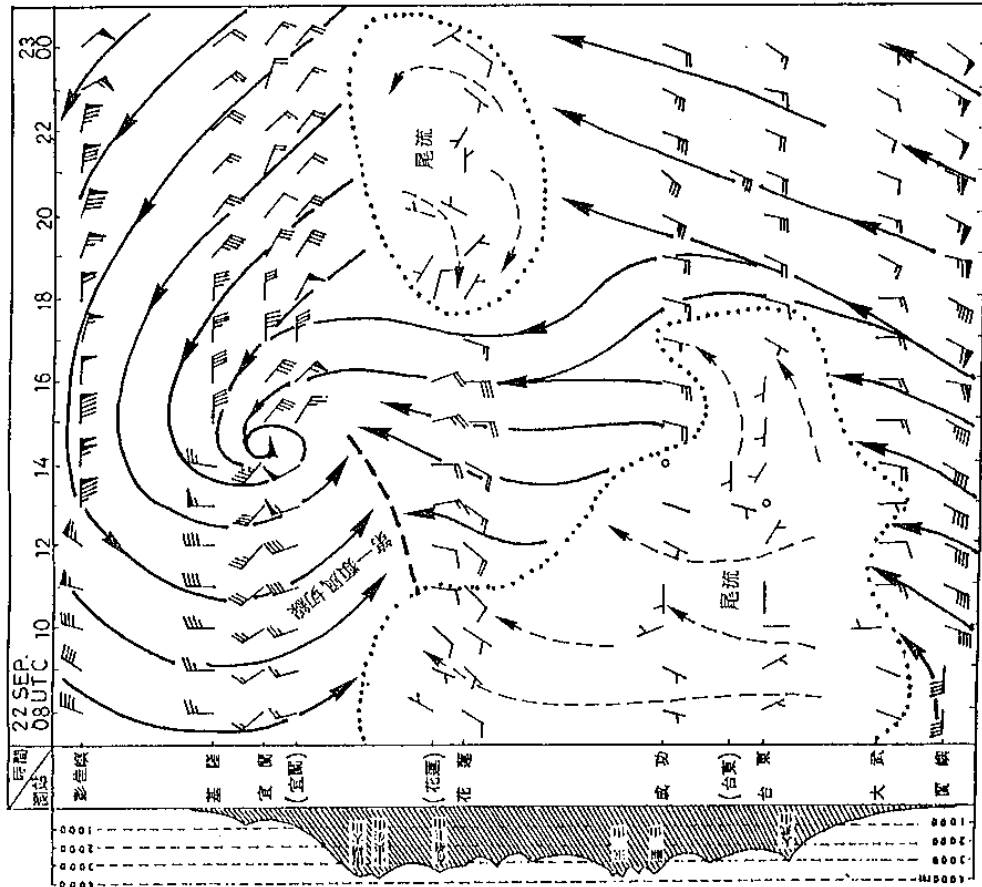


圖12(b) 同圖11(e)，但為1971年9月9日Bess颱風侵台於22日08 UTC至23日00 UTC期間，中央山脈東側者。其路徑圖見圖2。

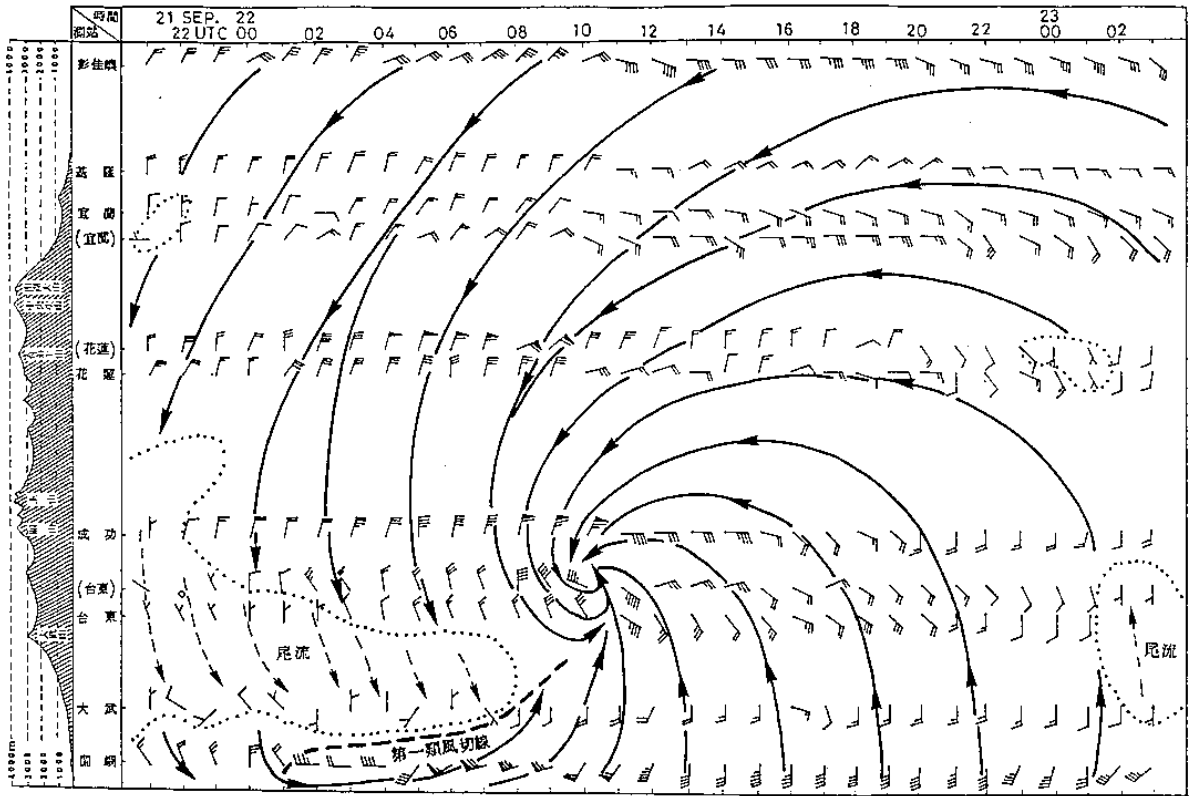


圖13(a) 同圖11(a)，但為1975年9月Betty颱風侵台於21日21 UTC至23日03 UTC期間，中央山脈東側者，其路徑圖見圖2。

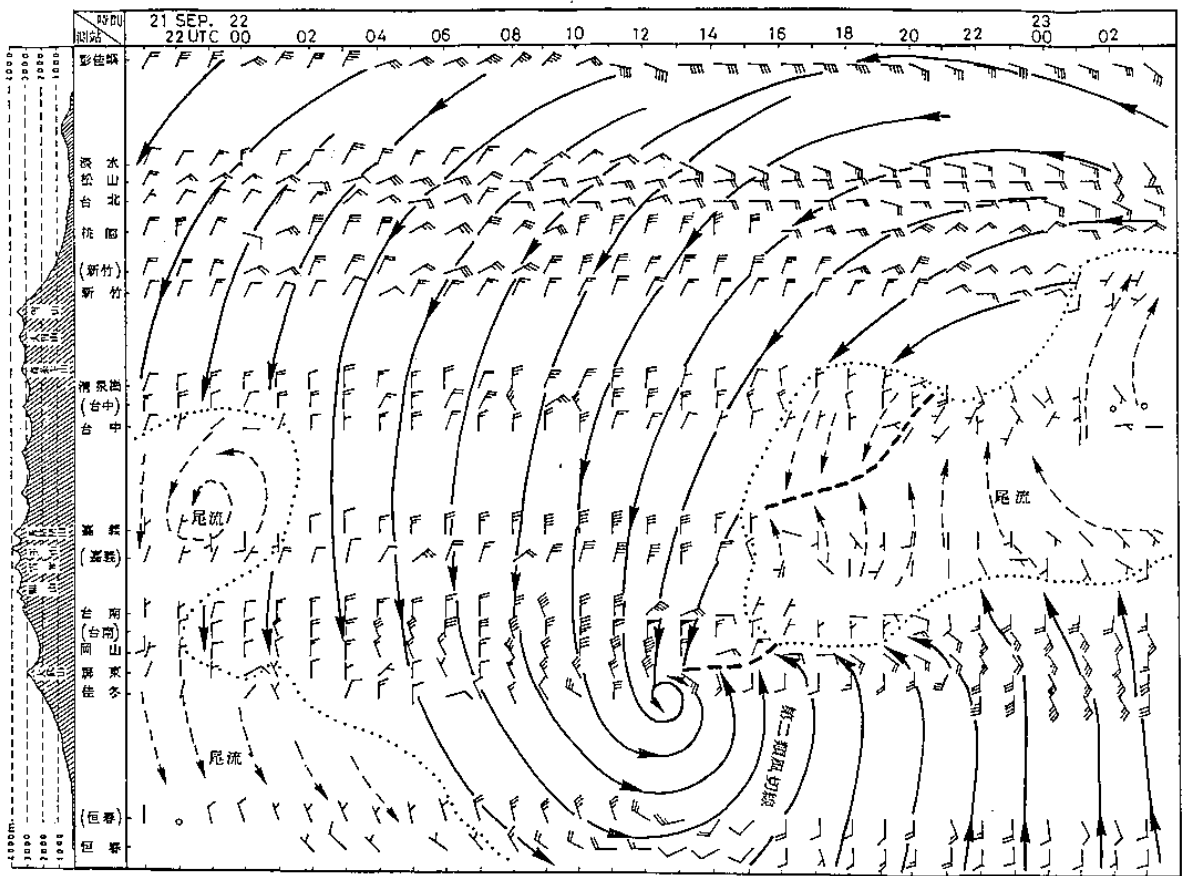


圖13(b) 同圖(a)，但為中央山脈西側者。說明同圖11(a)。

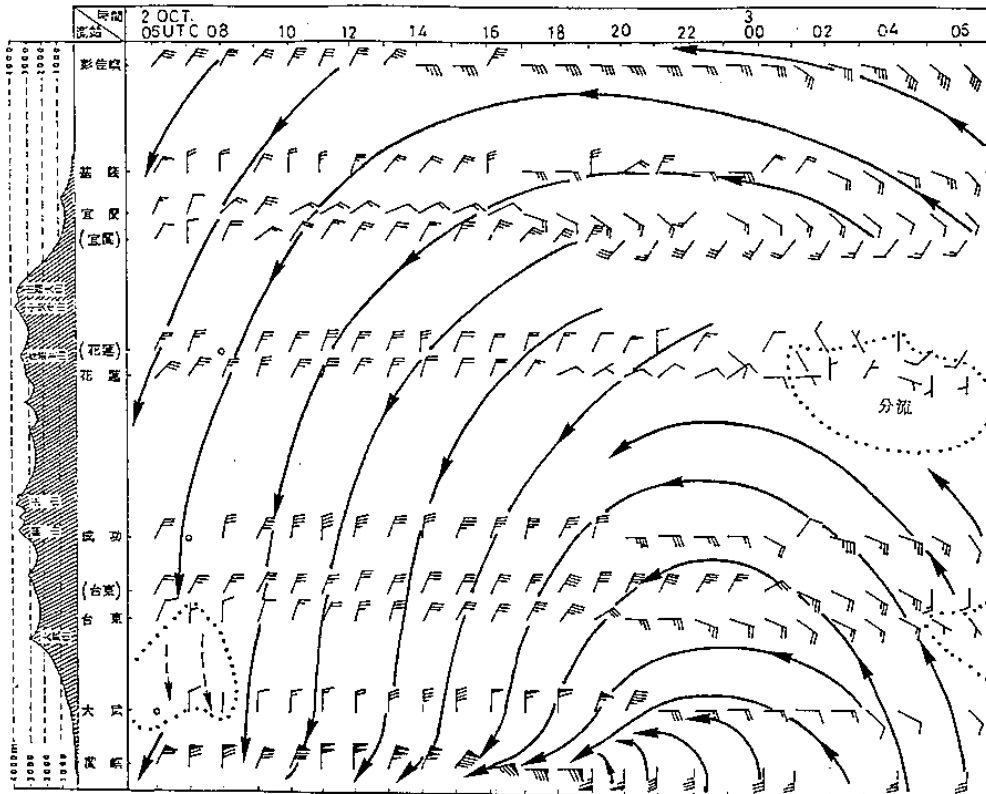


圖14(a) 同圖11(a)，但為1962年10月Dinah颱風侵台於2日06 UTC至3日06 UTC期間，中央山脈之東側者，其路徑圖見圖2。

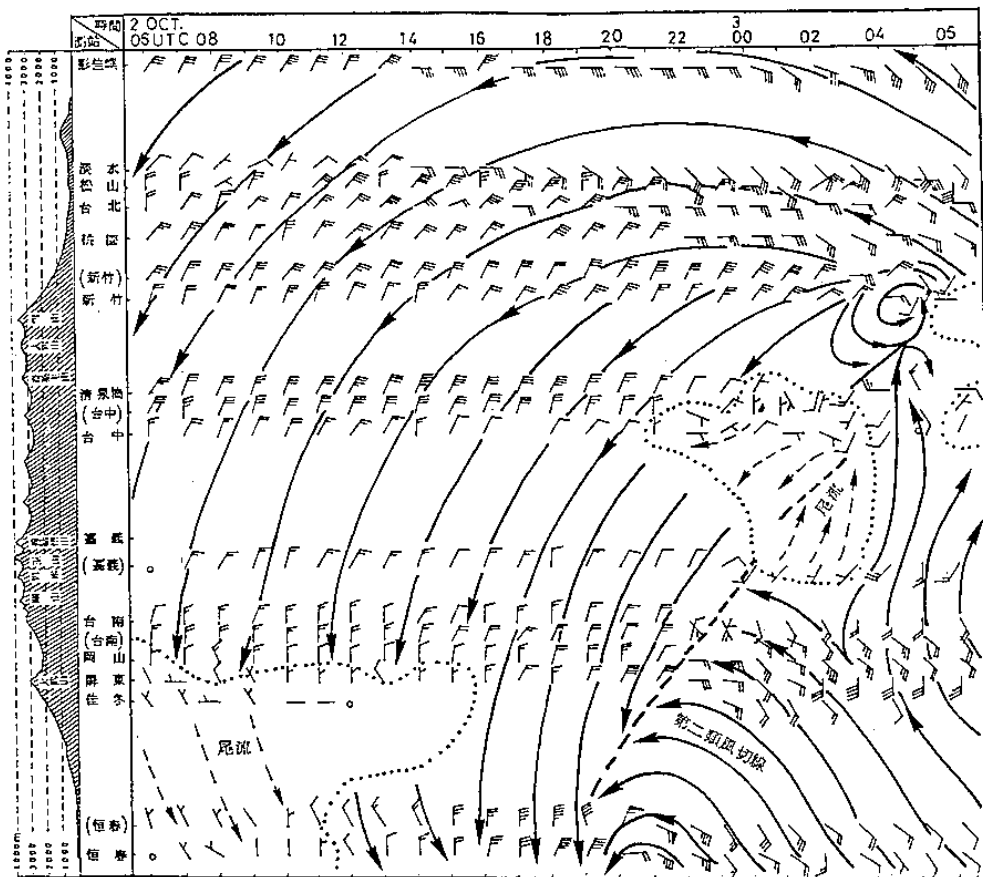


圖14(b) 同圖(a)，但為中央山脈東側者。說明同圖11(a)。

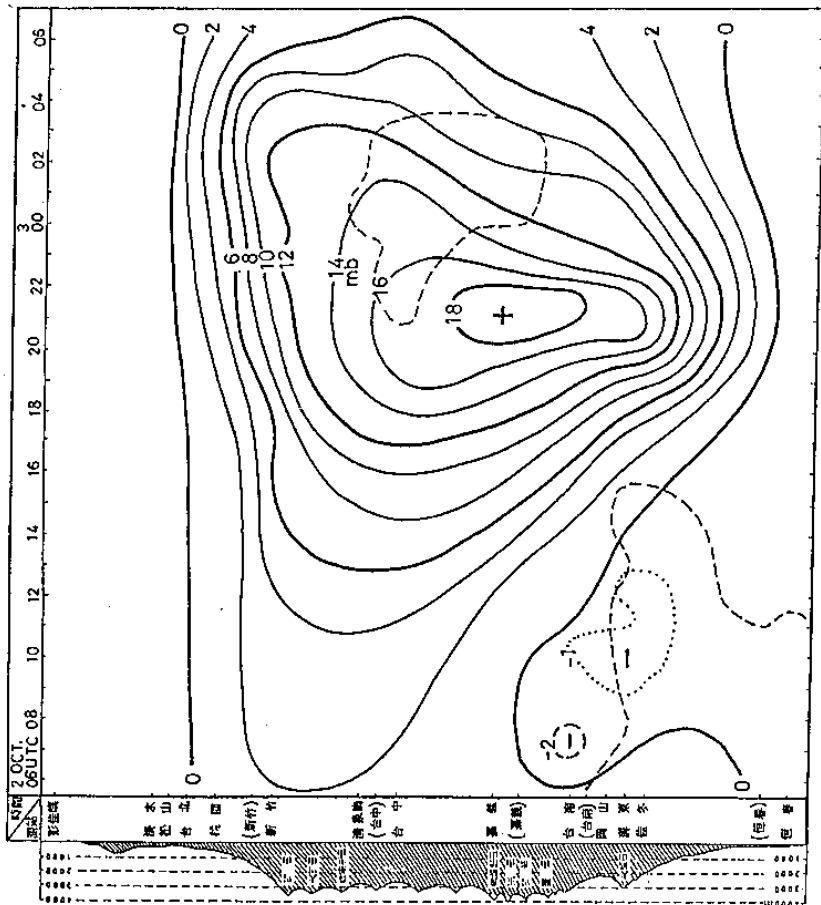


圖15 1962年10月Dinah 颱風侵台於2日06 UTC至3日06 UTC 期間，因氣流過山動力效應造成中央山脈東西側相同緯度顯著之氣壓差值(ΔP≡P(山脈東側)-P(山脈西側))分布圖。圖中並繪出弱尾流區如細斜線區範圍(說明見正文，又其路徑圖見圖2)。

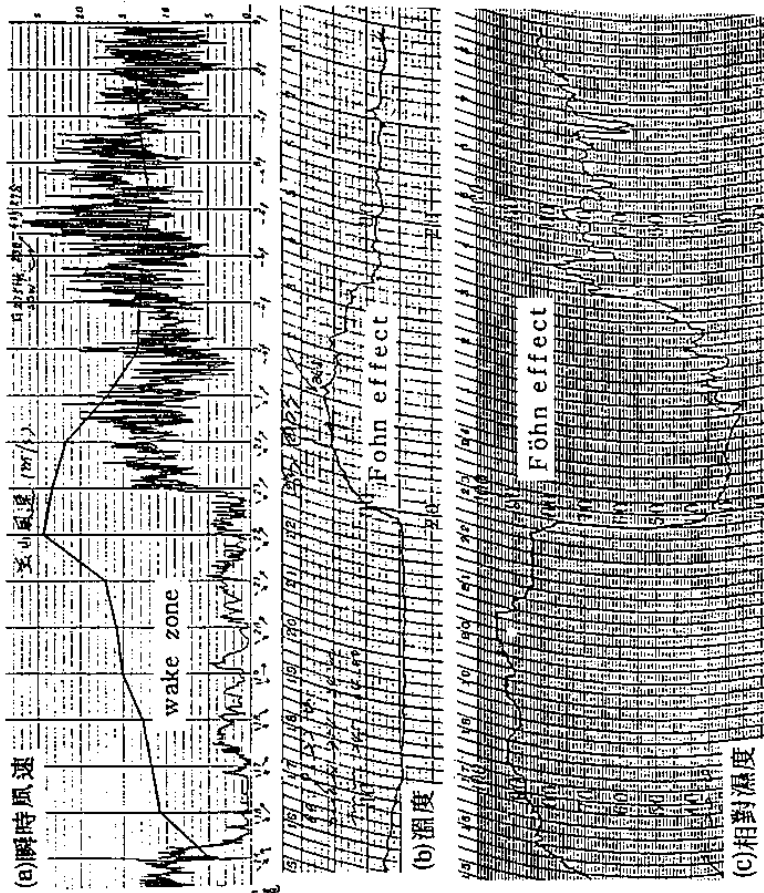


圖17 1971年9月22日Bess 颱風過境時，山脈東側成功測站自記錄。(a)瞬時風速(m/s)，(b)溫度(°C)，(c)相對濕度(%)。示該站先出現「尾流」(wake)，而後下坡風(焚風)，最後為「通道」

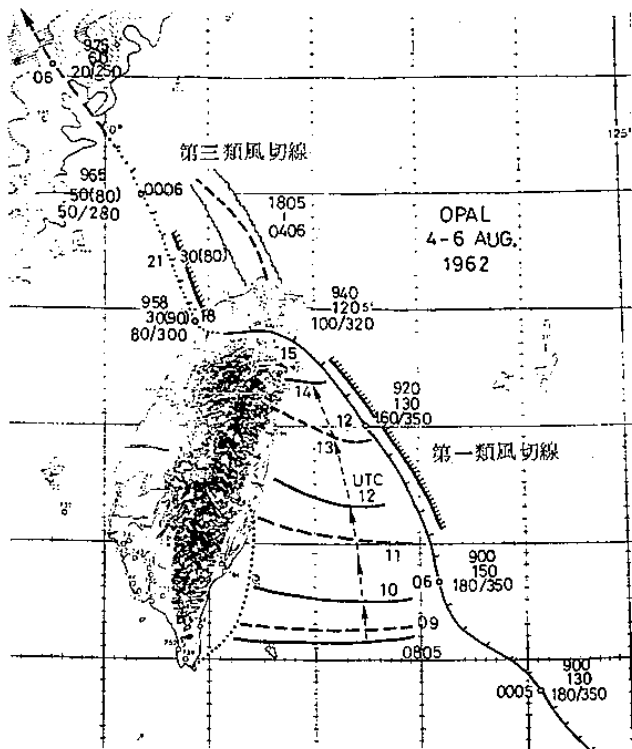


圖16(a) 1962年8月4-6日Opal 颱風過境時，「第一類風切線」與「第三類風切線」出現時間之逐時動態及出現時颱風中心所在位置連續變化圖。

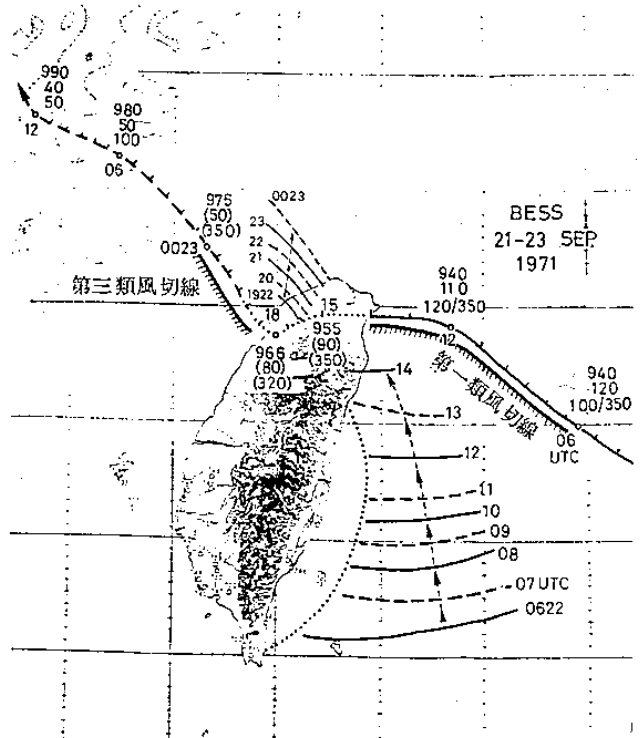


圖16(b)同圖16(a)，但為1971年9月22-23日Bess 颱風情形者。

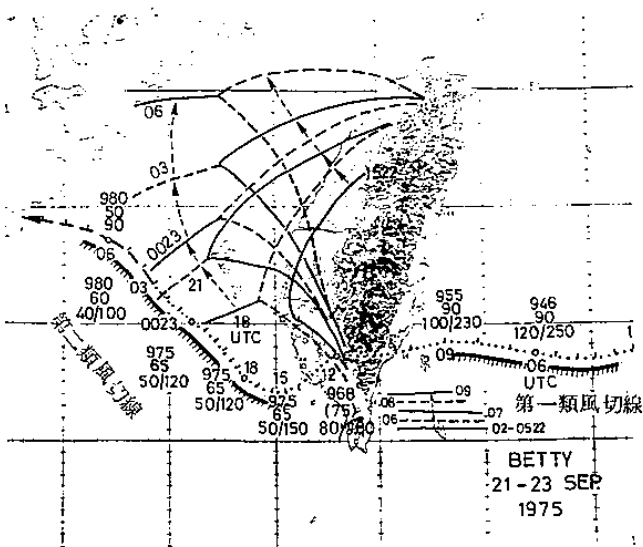


圖16(c) 同圖16(a)，但為1975年9月22日Betty 颱風情形者。另見於中央山脈西側邊界，略呈三角形分布區域，為Betty 颱風重新組織「颱風旋流」與海峽「明渠流」及中央山脈交互作用所造成之特殊「尾流弱風區」(wake zone)，隨時間(3小時間隔)之位移圖。注意，「第二類風切線」係連接「尾流區」者。

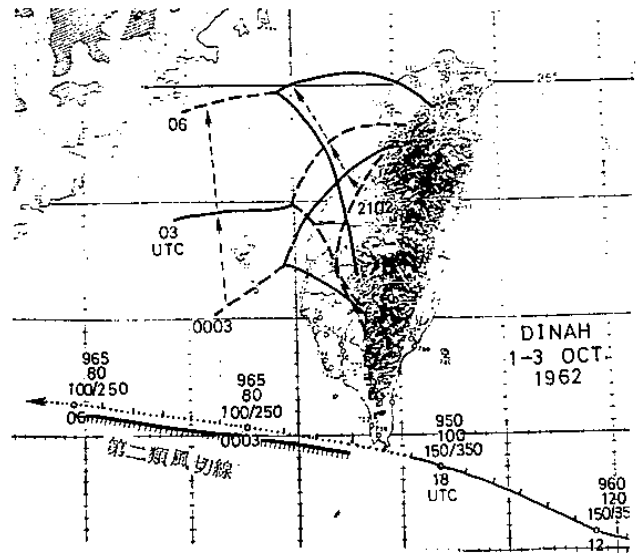


圖16(d) 同16(c)，但為1962年10月2-3日Dinah 颱風者。比較圖16(c)可見，兩圖在中央山脈西側之特殊「弱風尾流區」及「第二類風切線」之形式，甚相一致。

