

亂流預報作業討論

蔣志才

A Discussion of Turbulence Forecasting Operation

引言

亂流是指大氣均勻氣流中有小範圍不規律的運動，這種不規律運動在第二次世界大戰以前，無人注意，更談不上有所發現，第二次世界大戰各種航空器使用於戰爭，發生許多意外事件，經事後研究係空氣亂流航空器失却操縱所致，因為所有航空器之設計當初，均以大氣均勻流動為構想，加之飛行人員從無是項遭遇亂流經驗，屆時手忙足亂神經緊張，安有不出意外事件之理。第二次世界大戰結束，飛行員已有一般低空亂流之知識，可是由於噴射機的發明，飛行高度升高至五萬呎以上，高空往往碧空無雲，而飛機突然遇到疾風，顛簸不穩造成失事事件，例如民國50年7月有架52機飛往美國蒙太那州，天氣晴朗突然遭遇到亂流，45萬磅的機身幾乎翻身；又許多美國飛行員在橫越南美洲安第斯山脈時，常遇到嚴重之亂流，座艙從聯結處分裂，釘子也從釘孔中砰然脫出，本軍飛機也常遇到亂流。根據張敦明先生統計：53年7月至54年6月一年期間，在新竹基地噴射機任務歸詢509次中，就有125次遭遇到亂流，佔任務次數之24.6%，這種例證是不勝枚舉，然這種神秘力量由何而來？又從何去？這是值得研究之問題，美國亂流預報單位每天接獲之飛機遭遇亂流，填在圖上猶如螞蟥搬家似的密集，可見其對飛行安全影響之大，不言而喻，現就本人對該項作業所知，貢獻於有關該項工作者，作為研究參考，本人自亂流名稱述至預報考核為止，逐步舉例說明，其中有不到之處，尚請各氣象先進隨時不吝指教。

亂流名稱與起因區分

亂流者凡大氣不規律的運動，均稱之亂流，但亂流產生範圍有大小之分，高度有高低之分，強度也各有不同；其產生之原因也各異，有些亂流報告是隨伴着有天氣發生，有些晴朗天氣照樣有劇烈的亂流報告，所以很難分門別類為各種不同性質之亂流下定義，而僅能在亂流之強度方面作一輕、中、重、與嚴重等四級之區分，不過也有學者以亂流之

能量來源作以下五項區別：

1. 地形影響——因地形之不平滑，大氣流動近地面層發生不規律現象，而產生亂流稱之謂機械作用亂流（Mechanical Turbulence）。固然單一建築物所引起之小範圍亂流也屬此類，不過整個天空而言微不足道，為氣象家所忽視，然一大都市或山脈所引起之亂流範模較大，影響航空器飛行之安全，甚至影響天氣現象發生與否，故有部份氣象學者從事該項地形亂流之研究，並又產生所謂山波（Mountain Wave）之稱謂，也有稱山地波為重力波者，不過相信各氣象學者創名之時，原意略有不同，機械作用亂流，純係大氣流動受地形阻擋而引起不規則流動，未受重力之影響，其發展高度與範圍較小，而山地波之產生，不但因地形之影響，兼有空氣重力作用存在，其發展強度與範圍均較前者為大，不過山波常與機械作用亂流同時出現，實難辨別何去何從，故實質上兩者之起因均係地形影響，由於大氣不斷的流動，亂流範圍擴大而致有山波之出現而已。

2. 水平風切——在一平面因各處風向之不一致或風向一致而風速各異而引起空氣質點流動之不規律現象，亦能產生亂流，惟此項亂流之產生較緩慢，只能發生廣大區域之輕中度亂流，但若有其他作用力相伴，則可變為嚴重亂流，實際上凡是亂流之產生，起因單純，但至亂流開始，其他產生亂流的條件也相結合，以致亂流擴大複雜。

3. 垂直風切——為風速隨高度而異或風向不同，致有不同性質之上升與下降氣流和亂流。且如此垂直風切存在則亂流不止，尤其在高空無靜力穩定作用力，往往產生嚴重亂流而無其他天氣現象隨伴，也是近二十年來噴射機高空飛行之剋星，一般稱之謂晴空亂流“Clear Air Turbulence”如垂直風切伴有其他不穩定因素，則亂流之嚴重性將更為增加。

4. 熱力不穩定——氣象學對熱力的不穩定頗為強調，大氣中熱量的不平衡會產生局部空氣之對流，而該項對流未必與周圍大氣等速或相同方向，以致產生局部空氣之亂流，可是該項熱力不穩定之亂

流往往有天氣現象發生，如夏季的積雨雲，象徵着亂流之隨伴，又如漏斗狀雲出現，象徵着亂流已至相當嚴重。

5. 動力不穩定——大氣是空不斷流動，原空地面空氣可能被外侵的冷空氣抬舉上升；也可能因外來暖空氣侵入其領空，而造成不穩的亂流，範圍較廣，航空器進入後，不易立即脫離，好在這種亂流現象均有天氣隨伴發生，也為航空氣象人員必讀之課程，一般飛行人員也有此常識。

以上五項發生亂流之原因而言，最後兩項動力與動力不穩定之亂流，均有天氣現象隨伴發生，易為飛行人員察覺，氣象人員也可藉其一般氣象學識作一概要的預測，以保飛行安全，可是前三項原因，地形影響及水平與垂直風切所形成之亂流，未必有天氣現象隨伴，往往晴朗天氣下不知如何飛機會撞上了山；高空飛行時不知有何種力量使飛機顛簸不定，失却操縱，往往造成嚴重災害與損失。簡直是防不勝防，航空事業發達國家因此隱憂，故從事該項研究，美國該項亂流研究是由聯合民航組織先開始，後空軍方面於1961年也成立亂流預報部門在坎薩斯城（Kansas City），於1964年擴大研究與預報機構分兩地進行該項工作：一在加州馬區空軍基地（March AFB）；另一在麻州魏斯脫屋空軍基地（Westover AFB），目前該項作業又因戰略上需要合併至內布拉斯加州空軍基地（Offutt AFB），環球氣象中心，因為美空軍戰略司令部主該地，其所進行之亂流預測分為低空亂流與晴空亂流兩項，茲將該項亂流預測應用方法，就所知簡介如后：

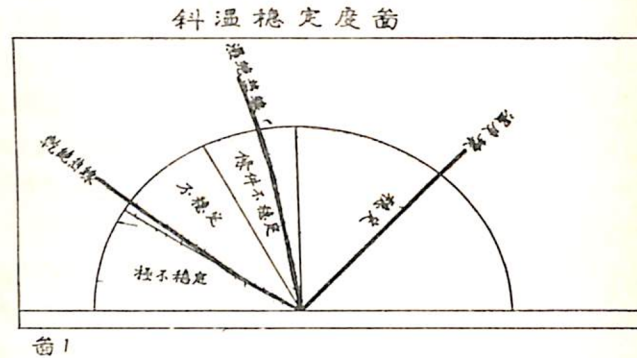
作業方法

1. 機械作用亂流：

該項亂流主要由於不平滑之地表面而引起，氣流運動經過地形之阻礙與摩擦，而產生波動及不規律的渦動為其主因，其亂流之強度，範圍與到達高度，當然也與地形發生關連，不過據美空軍環球氣象

中心與駐韓美空軍工作經驗，認為該項亂流之產生不但有關於地形，而與低層大氣穩定性及當地最大梯度風也有關係，因低層大氣之不穩定，能促使低空亂流之產生與加強，至於梯度風大也相對的表示機械動力充沛，故預測工作應予考慮該兩項因素，作業步驟如下：

(1) 低層大氣穩定度（通常預測地面最高溫度時之穩定度，也為最不稳定時之穩定度）：利用圖（1）之明膠板計算之，該明膠板係照 Skew T 斜溫圖原有各項穩定度線複印而製成，故僅需將明膠板重疊在當地探空資料斜溫圖上，察看低層（以地形高度而定）探空曲線在何方位，如落在穩定方位，則可認為穩定；若在不穩定方位，則可認為不穩定，易於辨別低層大氣是穩定抑或是不穩定。分析省時間。



(2) 最大梯度風（或用地面最大陣風速）：——當地觀測即可知悉該項資料，再由表（1）根據該兩項資料查出亂流之強度，如最大陣風為15—25 Kts，而探空資料顯示低層為條件性不穩定，即示將產生中度（M）亂流，其他依次類推。又若附近均為高山峻嶺而地形複雜，所查得本表亂流程程度應加高一級（次序為輕度→中度→嚴重→極嚴重，L

輕航空器亂流表

穩定性	穩定	條件不穩定	不穩定	極不穩定
風速哩/時				
10—15	輕度	輕度——中度	中度	中度——嚴重
15—25	輕度——中度	中度	中度——嚴重	嚴重
>25	中度	中度——嚴重	嚴重	極嚴重

表 1

→M→S→E）；若為平地或海洋則降低一級。

(3) 逆溫層高度；逆溫層猶如亂流大氣之鍋蓋，為預測亂流高度之依據。如逆溫層內逆溫很強，則亂流高度為逆溫層底加1000'，如逆溫層不顯則加多至4000'為止，例如某地某日8—9時地面陣風30 Kts，預測地面最高氣溫將高達36°C，是時850 mb以下大氣顯示不穩定，表中列示有嚴重亂流發生，但亂流到達何高度？則再查閱斜溫圖，假設4000'—8000'間有強烈逆溫，則預測亂流僅達5000'；若為輕微逆溫則預測高度增至8000'；又若無逆溫則預測亂流至能量正區頂再加1000'—4000'，此根據探空能量正區大小而定。

此法僅用於單點預測局部亂流，以供輕航空器低空航行參考。如本軍螺旋槳飛機作本島短航程飛行，利用當地觀測資料預測附近低空亂流，不失為可試用之方法。

2. 山波：

係大氣受地形影響所引起之亂流，該項亂流常出現在山頂上空與山之背風面，有時有滾軸狀雲出現，在雲中有困人之亂流，雲尾部邊緣亦有潛伏下降氣流，每分鐘可下降五千呎，這種捲雲之上還有凸鏡雲存在，通常靜止不動，表面平滑伸展高度甚高，形成於向風面而消失於背風面，但也可能在山脊下風側形成十排之多，對飛行員而言，這是一種危險信號，可是山波未必一定有雲形成，當水汽不足形成雲雨，也可能產生一種乾的波動，其波動雖起因於數千呎的小山脈，可是其產生之波動與亂流可高達數萬呎，故山波之產生及其強度決定於山脈

之高度，該地區各層之風向風速及山脈前後之氣壓差，因為氣壓差代表山脈兩面大氣壓力不均衡程度；風向與山脈成90度最容易產生山波，與山脈平行除非風速很大，山脈兩側易產生滾軸形渦動外，否則無此可能；至於風速而言，側風風速愈大則產生亂流愈嚴重，風速微弱則無此可能；又山脈高度愈高產生亂流區域愈大，嚴重性也增大，故山波之產生預測工作，如除熱力作用及其他天氣現象影響不論外，僅取決於山脈高度之風向風速與山脈兩側之氣壓差，山脈高度預報員預先已知，如美國西部洛磯山高度約15000呎，他們用10000至20000呎層之高空風作為計算標準以16000呎高度為山波與晴空亂流之分界高度，16000呎以下有亂流稱之山波，16000呎（包括16000'）以上者稱之晴空亂流。

山波之強度分輕微；中度與強烈三種，其所用基本氣象資料為：海平面氣壓；山脈高度之風向風速與垂直風切，垂直風切一項指山脈高度上下定壓面層間之風切指數而言，僅作決定亂流程程度之參考。以下第（2）表為作業時所必需者：

A. 其中第一項區域係為作業方便而自行劃定，如本島可劃分為1 2 3區指北，中，南部台灣地區，若情況需要可擴大範圍增加作業區域。

B. 第二行測站——指山脈兩側有代表性之兩測報站，該兩站選擇儘量求其同緯度與同高度，不然又必須加氣壓修正值。

C. 第三行氣壓差——指上述兩測站之海面氣壓差，單位毫巴（mb），以右測站值減左測站

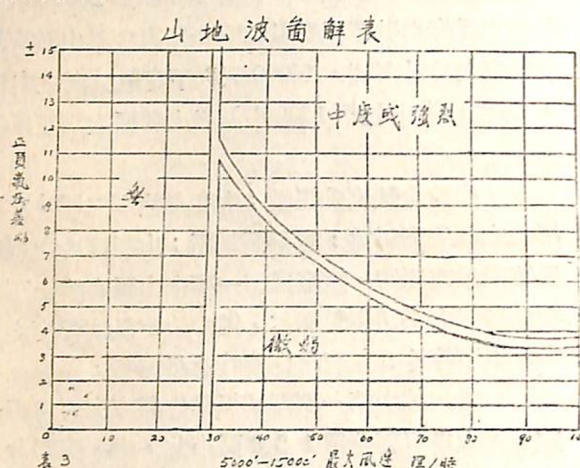
山波作業表

日期 時間

區域	測站	海面氣壓 mb	氣壓差 mb	最大風 5000—15000'	山波					垂直風切	備考
					無	輕	中	重	極重		
1	新竹	1013.6	+2.0	060/35		✓				4	
	宜蘭	1011.6									
2	公館	1012.5	+4.5	320/80			✓			7	
	花蓮	1008.0									
3	台南	1007.0	-3.5	240/45		✓				5	
	台東	1012.5									

表 2

者，其所得氣壓差為決定亂流之重要因子，至於差多少方產生亂流，亂流強度如何？必需根據平時亂流報告作如表3之統計分析。因各地區地形各異，高度不同及氣壓系統形態也隨時改變，故也無明確公式計算二地氣壓與亂流之關聯性，僅能以實測之報告作一與亂流關係之統計分析，故其分析結果因異地而有不同，至於台灣地區該項亂流報告太少，張敬明同志所作之一年資料統計，其中亂流高度均在16000'以上，而中央山脈平均高度不及10000'，不可利用作為山波之分析統計，故本表所列數值僅作為舉例而已，而非決定山波之氣壓差標準。



D. 第四行最大風——係指山脈高度最大風之風向風速，中央山脈中南部高度較高，均在10000'左右，北部也達5000'左右，故中南部其所用高空風以用10000'—15000'間最大風為宜，如缺乏各高度之高空風資料，為作業順利進行起見用700 mb 層風未尚不可，至於北部照樣用 850mb 層風取而代，決定亂流之風向以垂直山脈走向左右各45°為限，在此中間90°範圍內之風向均適宜產生亂流。當然此非絕對，然一般均以此為準則。至於風速準則因地有異，以將所有亂流報告資料如表3作一統計分析為宜，美空軍方面定產生山波之風速標準範圍在25—35 Kts之間，達其標準者即有亂流可能，至於亂流強度如表3所示，風速與氣壓差愈大則亂流愈強，低於臨界線者則無，故圖一各地之風向風速決定後，填列在同天氣圖比例尺之明膠板上，當作業時僅將該明膠板重疊在850或700mb之定壓面圖上，觀察該層風向風速是否在產生亂流標準範圍，並將其數值填入該行內。

E. 第五行山波預測——根據前四行資料查閱表3所列標準，該表縱座標為山脈兩側測站之氣

山地波南風之關係圖



圖2

壓差數值，橫座標為山脈高度之最大風速，如察閱圖一發覺風向不適宜則不必查閱表3。同時由表二之臨界線觀之，風速愈小愈不可能產生亂流，氣壓差亦然，縱橫座標數值愈大，所產生之亂流強度也愈嚴重，至於其臨界線之產生，係將所有亂流報告資料點列該項座標圖上，再分析所有報告之密集區，再劃分定臨界線，由此界線則決定山波有無與其強度。如在臨界附近難以決定時，可參考下行資料。

F. 垂直風切——係指山脈高度上下兩層間之垂直風切指數，每1000'差1Kts為指數1，如在台灣中部第2區15000'西風40Kts，5000'為西南西風10 Kts，則風切指數為 $(40-10) \div (15-5) = 3$ ，若指數達3者有亂流產生，但本項僅在疑難時作參考。

由以上三圖表資料可決定山波，然該三圖表之決定標準，則有待從業同志平時收集亂流資料，經統計分析後方可定各項臨界標準，相信所收集資料愈多，所得出之臨界標準也愈精確，本篇僅在作業程序與方法上，作原則性之介紹，深盼從業同志能作進一步之深刻研究，期能準確預報山波之產生與消失，以促進飛行之安全。

3. 晴空亂流：

晴空亂流顧名思義該是晴朗天氣情況下之亂流，方可稱謂晴空亂流，否則不可謂之“晴空”，事實上作業人員在作業過程中並不考慮地面天氣現象之發生，因其研究範圍為16000'以上者，在該高度以上多半為晴空，即使有雲也決不會如地面有雨、有雪、吹沙等之蓋天蔽日現象，作業人員僅考慮會不會發生亂流，而不考慮其他天氣現象是否隨伴而

生，其作業步驟如后：

A. 資料之整理分析：

(1) 高空風垂直剖面圖——(如圖3)，資料自16000'起填繪至60000'為止，中間層如因傳遞失却可註明“M”字樣，以資辨別；若資料僅到45000'則在該高度曲線上註以“T”表示已到頂；若所填繪之曲線出乎常軌，對中間有疑問之資料應參考其他周圍測站資料予以修正，同時對流層必需標示，通

照此方法分析所有測風站之高空風剖面圖，每地一份，凡高度至16000呎以上，風速達50Kts以上者，均在分析範圍，上例第二三層風切分析頗為標準，惟第一層分析雖分析風切指數達3，然其最大風僅達43，不到分析標準，故可省略之，不過分析最大風速有時在剖面圖有2或3次最大風之出現，乃必須分別分析記載，以便分析辨別噴射氣流。各地分析風切資料記載在表(4)，如有多層最大

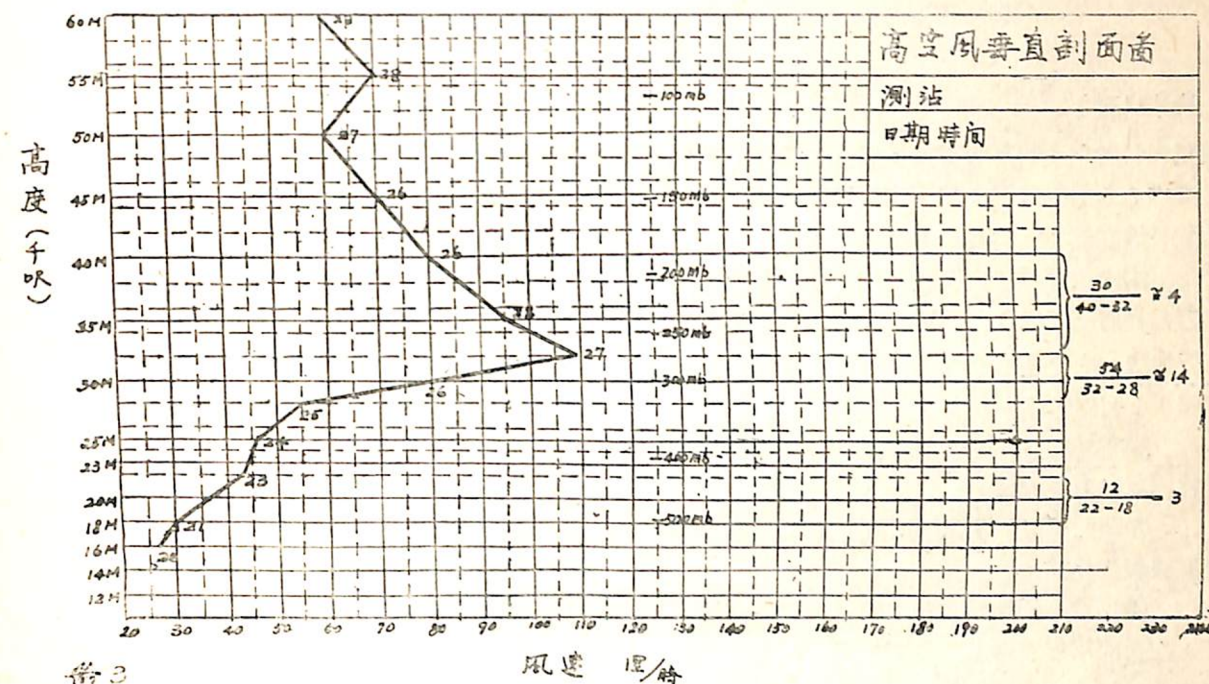


圖3

常最大風在對流層頂附近，然最大風速高度不一定就是對流層頂高度。編列。

圖3剖面圖之主要用途為求各高度之垂直風切指數，以每高度差一千呎而風速上下差1哩為1 (1 Kts 1000') 曲線右側二位數表風向百度及十度數，普遍風切指數小於3者不予計算省略之，3或3以上者分別計算後記載之。如圖3曲線所示，顯然高度在18M→22M間；28M→32M間與32M→40M間曲線斜度較大，垂直風切指數有可能超過3，其他各層曲線斜度不大，近乎垂直其垂直風切指數不可能大於3，可省略之。垂直風切指數計算舉例如下(如圖3曲線所示)：

第一層 高度22M—18M相差4M，而風速差12Kts則風切為 $12 \div 4 = 3$

第二層 高度32—28 = 4M而風速差54，則風切為 $54 \div 4 = 14$

第三層 高度40—32 = 8M，而風速差30，則風切為 $30 \div 8 = 4$

風出現，則分別記載之，凡最大風上方之風切為負

垂直風切紀錄表

測站	最高風速	風向	風速	風切層底	風切層頂	風切指數	附註
上海	32m	27/110		32	40	-4	
				28	32	+14	

表4

，在下方者為正，以風速最高點為分界。以資識別。

(2) 垂直風切紀錄表紀錄各高空測站之垂直風切指數，如附表(4)：

第一行 填寫資料之測站名稱或代號，逐一填入。

第二行 為該測站最大風速高度，以千呎為單位填寫，然垂直剖面曲線有時成鋸齒狀，而主

不同高度上出現有二三次的最大風速，其最大風速數值不一致，然均在 50 Kts 以上，並風切指數均在 3 以上，則該二三兩層最大風速也應填列，以作為決定噴射氣流之參考。

第三行 風向風速，係指最大風而言，風向以 10 度為單位，風速逐填實有湮數。

第四行 風切層分底與頂兩項，其頂與底係指風切指數超過 3 之頂與底高度，也以千呎為單位。

（上接第 11 頁）

作為預報參考之資料等等事實，謂宜自明年（57 年）颱風季（5 月至 11 月）起，本省軍民氣象測站，應加強長浪之測報，其辦法略舉如下：

(1) 由主管氣象之交通部門（中央為交通部，地方為省府交通處）會同軍方洽商陸地及船艦測報海浪辦法，由交通部（處）為召集人最好在明年（57 年）1 月間召集。

(2) 開辦海浪觀測短期講習班由海軍氣象中心與省氣象局會商辦理。

(3) 參照國際氣象電碼以及海空軍氣象手冊編訂海浪報告格式。

(4) 指定若干地點為長浪測報之重要測站，例如：左營海軍氣象台，高雄測候所，東港探空台，海口（近恆春）海軍氣象站為重要測站，其他本省沿海及重要外島如蘭嶼、彭佳嶼、馬公、鵝鑾鼻等軍民測站並包括海關所設燈塔（管理人員）以及

（上接第 16 頁）

之，使氣象理論能直接迅速用之於天氣預報，“自動描繪器”描繪一張天氣僅費時六分鐘而已。

(4) 天氣預報，今日美國國家氣象中心以及海空軍各主要氣象單位，除利用電子計算機製作各種長短期天氣圖表外，對三千呎至四萬呎間各高度高空風溫度之分析與預測，亦已幾乎完全仰賴電子計算機之計算。即以美國國家氣象中心附近之美空軍氣象分隊為例，該分隊專責供應美空軍長程運輸機所需之航線高空風溫度預報，利用國家氣象中心電子計算機所求得之高空資料，再將本身需求資料與條件送入電子計算機再行計算，即可獲得航線上所需之高空風與溫度預報，該分隊除發佈此種定時航線預報外，同時並可接受臨時指定之航線預報，亦

第五行 指數，即為垂直風切指數，其指數計算如圖 3 所標示之實例，即以風速差除以高度差得之，最大風速高度上方者風切指數為負，下方者為正。如有二、三次最大風速，其指數之計算與填列亦然，但有主次之分，主要者始終填列第一項，以次類推。

該記錄表所填列資料頗為重要。因高空亂流之產生，垂直風切為其主要原因，有大的風切必有亂流，尤其是垂直風切為然。（未完待續）

海濱鹽場測候站等凡便於觀測海浪或重要地點（例如枋寮）均作長浪觀測（燈塔地點如無通信設備亦可作海浪記錄以資參考）。

參 考 文 獻

註一：岡田武松氣象學（1935）下卷 421 頁。

註二：日本氣象學手冊（1959）663—664 頁。

註三：Monthly Weather Review, Vol. 63 (1935), pp264-271。

註四：高振華：由「八七水災」討論南海風暴預測問題（1959）刊農專學報第二輯 55 頁。

註五：戚啓勳：颱風登陸後之風和雨（1961）刊台灣省氣象所簡訊第 184 期（50 年 5 月）。

註六：萬寶康：近年熱帶氣象之發展（1951）刊氣象通訊第 6 卷 4.5.6 期合刊 6 頁（台灣省氣象所發行）。

僅需數分鐘即可完成供應任務。

六、結 論

電子計算機賜予氣象界之貢獻既多且大，今後之趨勢，舉凡氣象上之觀測，繪圖分析以及預報等，終將全部由電子計算機擔任之一日，因此，吾人過去對氣象認為係藝術之觀念，勢將有所改變，今後之氣象工作將由藝術工作蛻變為一種純科學純數理之工作。因顧國內氣象界由於客觀環境限制，仍侷促於主觀及人力之地步，環顧先進國家氣象界在電子計算機之賜助下，正以一日千里之勢向前躍進中，吾氣象同仁亟應誠惶誠恐急起直追，迨不為時代所遺棄也。