

中型晴空亂流結構之調查研究

王輔章譯

The mesoscale structure of some regions of Clear Air-Turbulence

撮 要

以飛機之風與溫度觀測為手段再結合客觀與主觀之亂流紀錄，以作晴空亂流區大氣結構之調查。飛機資料性質及固有之假定，均在分析中予以刻畫描述。垂直與水平風切場，安定性及李察德遜數等詳細情況亦以三不同氣流型陳述於所遭遇之亂流中。即深槽，反氣旋性噴射氣流及強烈平直噴射氣流。嚴重亂流（強度相當於同一飛機在成熟雷雨中所測量者）曾被發現於槽脊之某些部位，而中亂流存在於平直噴射氣流中。藉事例之比較後廿多次其他飛行說明在亂流區的氣流條件上有某些同一性與差異性存在。為晴空亂流之存在此必需或充份條件並非獨立。然而，某些中型範圍之條件則顯屬重要，包括風向與風速的劇大垂直改變，高空面或對流層頂之直減率的不連續，尖銳的軌跡曲率及可覺察的垂直運動。這些條件相信有利於可能主宰亂流機械結構的短期和不穩定波。

一、前 言

對流層上層及平流層下層之晴空亂流影響飛行之安定性已為人所盡知之事。但因缺乏足夠之觀測資料，所以，至今吾人尚無法完全瞭解這種亂流之性質。可供研究晴空亂流之資料，包括若干飛機測得之亂流，和同時測量之風向風速及溫度。本文僅利用這些資料以研究風和溫度場之結構與相伴發生之晴空亂流。而研究之目的，則為欲發現各次遭遇亂流時氣流型之異同。吾人將詳細討論以下三種情況；第一種情況為與高空槽相伴發生嚴重而持久的亂流。第二種情況為在強烈噴射氣流中（193哩/時）無亂流，但其垂直風切與水平風切却適宜生成亂流之趣事。第三種情況為與反氣旋型噴射氣流相伴發生之嚴重亂流。另外尚有廿種其他情況，將在第六節予以簡述。

二、資料和分析方法

用於分析的原始資料包括空軍劍橋研究室於1957年研究噴射氣流期間，B-47 飛機測量所得之風、溫度和亂流。Endlich與 Kados 兩氏已於1959年描述風和溫度的特性。亂流是由用於測量小型旋渦（直徑在 25—200 公尺間）而經過改良的 VGH 所測量，這種儀器包括與空速表相連之皮氏管（PITOT），如此可以記載陣風水平分速，而此陣風之測量並不受飛機的性質和飛行之影響。亂流強度之標準如下：

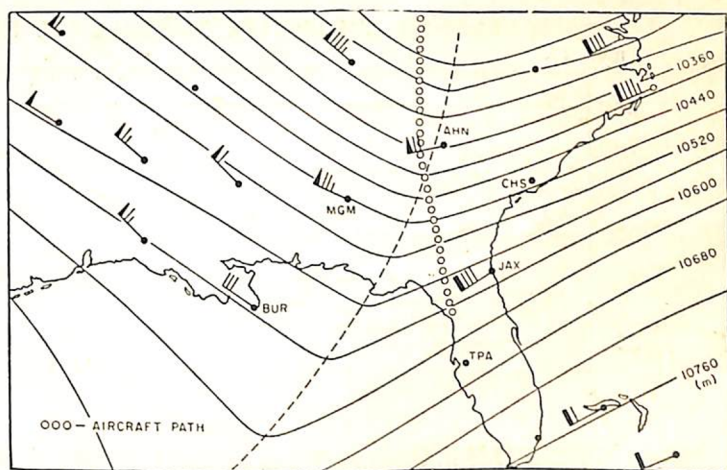
陣風（呎/秒） <5 5—9 10—19 ≥20

強度 無亂流 輕度 中度 嚴重

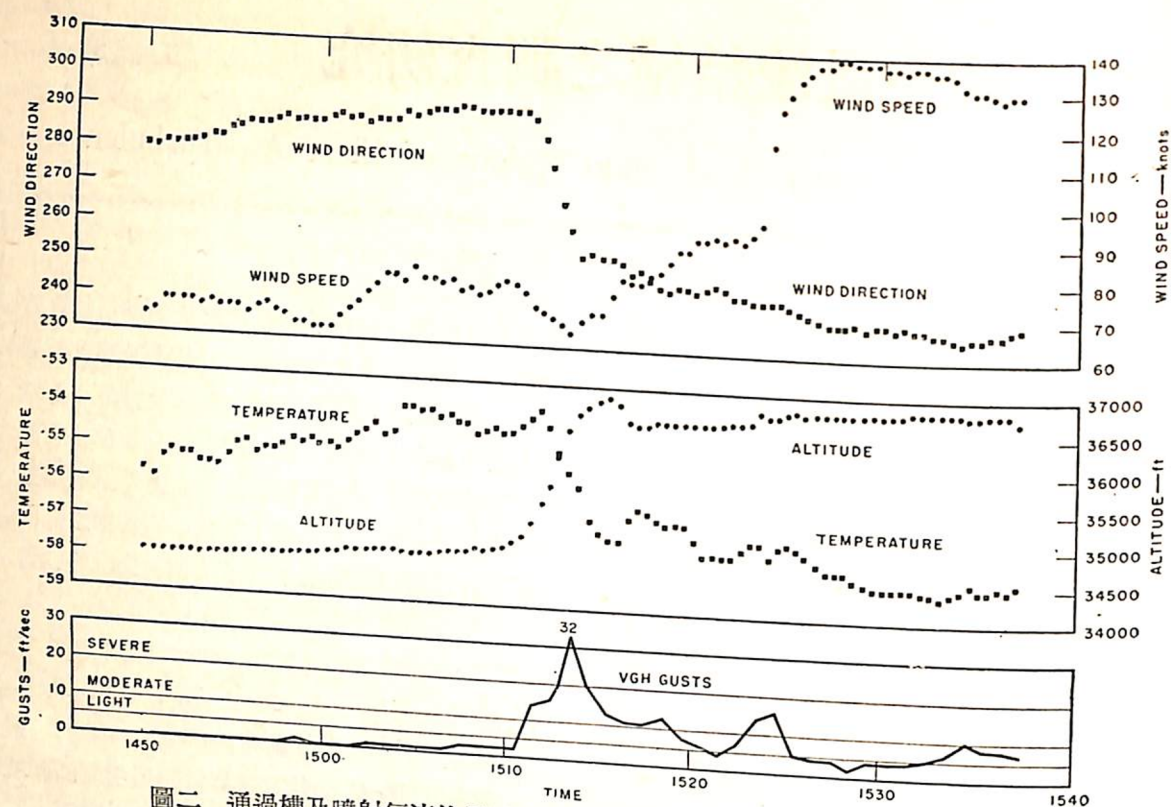
通常，B-47 的航路選擇約與風垂直而圍繞噴射氣流心飛行。這種測量約需四小時，習慣上將所獲資料視為同一時間而繪於同一剖面圖上予以分析。但事實上，在飛行期間氣流可能已發生變化，吾人若欲修正這種錯誤，可使飛機在同一路徑上飛行若干次，以偵知氣流系統的運動，而予以適當的修正。

三、與滙流槽相伴發生之亂流

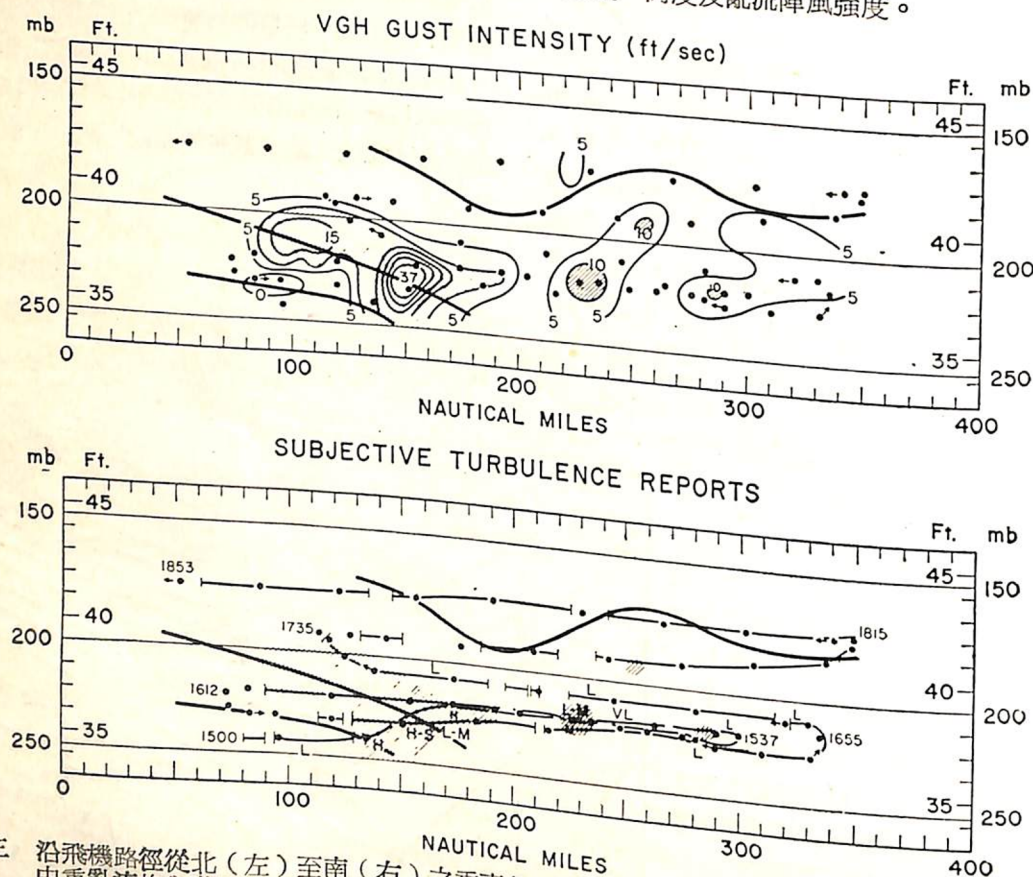
圖一為1957年三月二十九日 B-47 第二十七次飛行之路徑，其高度與美國東南部250mb等壓面相同（飛行路徑與到達各點之時間亦在圖三下方表出）



圖一 250mb高空圖，表示1957年3月29日第27次飛行之亂流槽及飛機飛行路徑。



圖二 通過槽及噴射氣流的風速、風向、溫度、高度及亂流陣風強度。



圖三 沿飛機路徑從北(左)至南(右)之垂直剖面圖。上圖為用 VGH 儀器所測之陣風強度。中重亂流均以陰影顯示。實粗線為熱力層界線(參見圖五)。下圖為飛機路徑,時間(GCT)及由飛行員所報告之主觀亂流。實線代表可感亂流。數字為對飛行員報告之註釋; L代表輕度, M代表中度, H代表重度, S代表嚴重。

)。圖一內之槽伸入美國西北部與一地面包圍面相伴,但以後東移則與地面界面無任何關連。在圖一範圍內槽之移速為每時25哩,嚴重亂流發生於槽及槽之下游區域,中度亂流發生於噴射氣流心附近之三個較小區域內,此槽在 250mb 非常顯著,但在 500mb及100mb圖上却無法分辨出來。

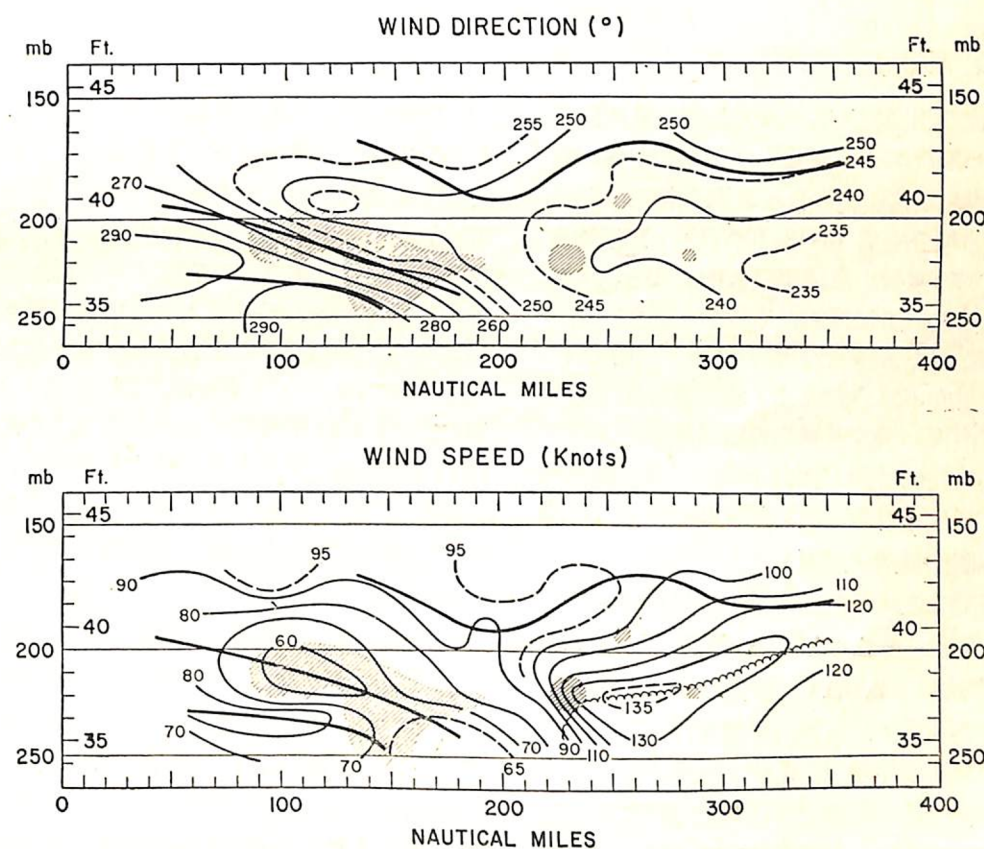
亂流與風及溫度場之關係(如圖二所示)嚴重亂流(在1513G.C.T.)與風向劇變之槽相伴發生,中度亂流(在1524G.C.T.)與風速劇變而風向甚少變化相伴發生。高度曲線顯示,在嚴重亂流區飛機被估計曾為2米/秒之上升氣流上拂達2000呎,在同一高度飛行兩次,發現風與亂流之關係相同。

圖三為一由喬治亞州北部至佛羅里達州航路上亂流區域之垂直剖面圖,客觀的觀測和主觀的報告完全相符,飛機觀測資料沒有指出主要亂流之上下界限,這可能是由於亂流區域較圖三所示者愈向上愈向左伸,愈向下則愈向右伸之故,但無論如何,主要亂流區域至少 100 哩寬5000呎厚,其持續性至少為二小時,其向下游之廣度尚不得而知,但至少

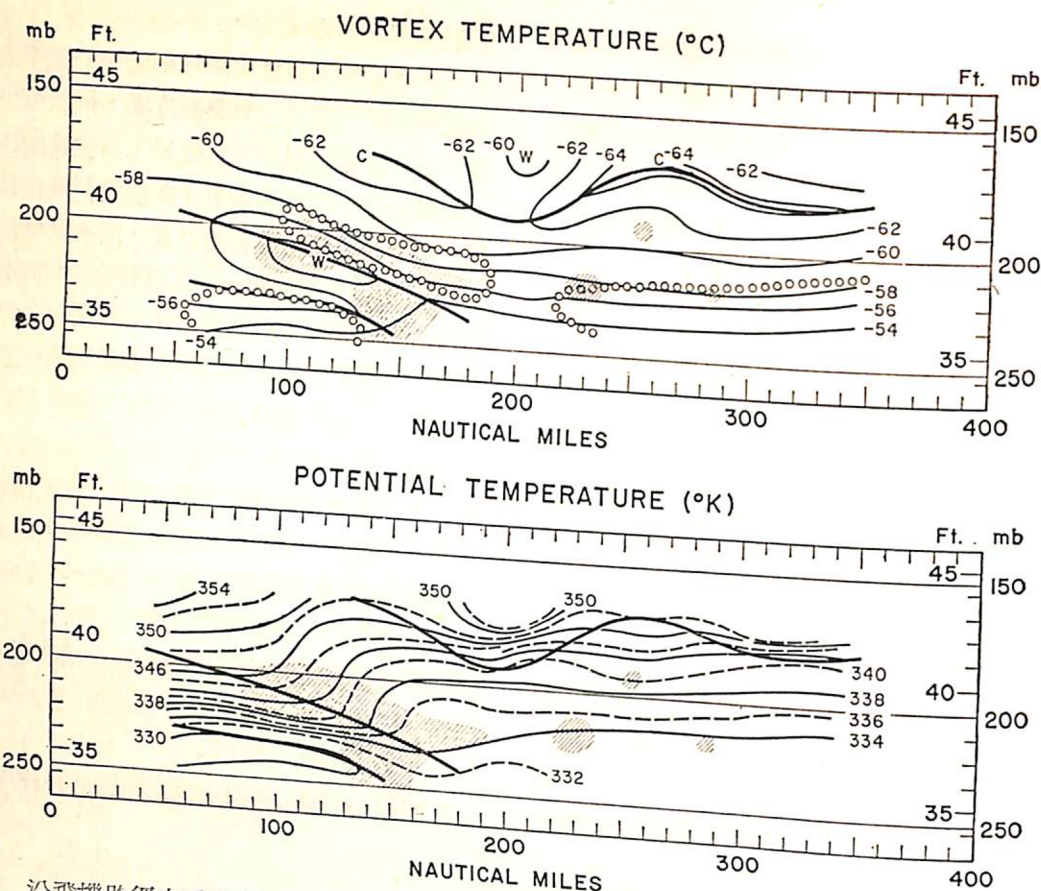
超過其寬度甚多。

圖四及圖五係根據飛機觀測平均每十五哩有一百個資料點所繪製之風與溫度場,按照第二節的討論,吾人需指出最初三次通過(高度範圍在1000呎)除整個槽之位置移動外,其他資料變化甚小,沿航路轉變的分速約為每時八哩,所有點均依此速度移動至對照參考時間——(資料之平均時間1700G.C.T.)的新位置,如此吾人即可視所有各點之資料時間相同而分析之。圖四示主要亂流區位於風向在垂直與水平方向均急劇變化而風速較四周為小之傾斜層內,此層即圖一所示之槽。圖五之溫度場顯示槽(風向在290°與260°之間)為一溫度相當穩定層,而該層之上下溫度遞減率均極陡峻,圖五上圓圈線圍繞之區域表示溫度遞減率超過 -9°K/km ,最強烈之亂流集中於穩定層之上限。總言之,主要亂流區與尖銳之槽相伴發生時,則此槽有顯著的風向變化,穩定的溫度遞減率,而該穩定層之底部風速特大,其上風速特小。

圖四中三個小型中度亂流區與135哩/時等風速



圖四 沿飛機路徑之垂直剖面圖。上圖為飛機所測之風向。下圖為風速,圈線所示者為卷雲上界。陰影為中或嚴重亂流區。



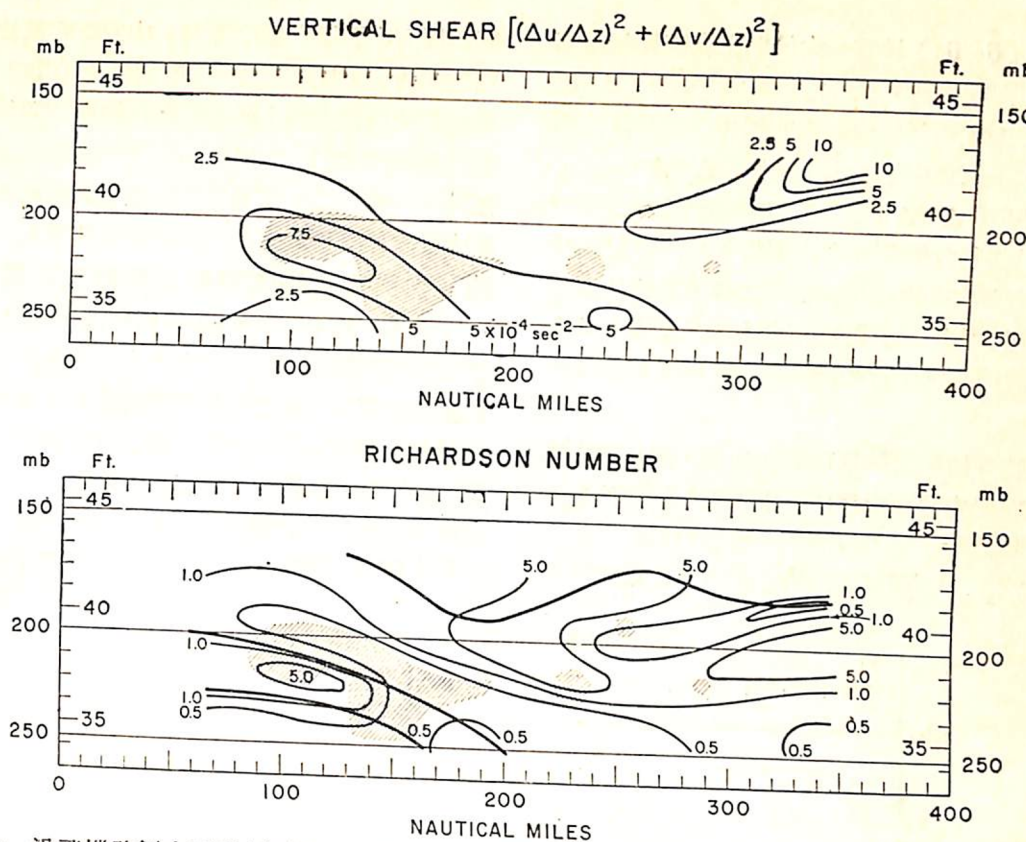
圖五 沿飛機路徑之垂直剖面圖。上圖為飛機所測之溫度。下圖為位溫，粗實線為層界或對流層頂。

線之噴射氣流心相關連，其中最大最強的亂流區位於噴射氣流心氣旋型一方與強的水平風切（每10哩內有30哩/時之變化）相吻合，此區最初三次通過時所遭遇之陣風分別為16、12、10呎/秒，顯示強度正在減弱。其他兩個小亂流區只被觀測到一次。噴射氣流心下面之一層溫度遞減率十分不穩定。圖四之下圖顯示卷雲上限適通過噴射氣流心，根據飛行員報告此卷雲向下風方向延伸，地面觀測顯示在噴射氣流心之南面一廣大區域均為卷雲掩蔽，如此，顯然的卷雲的左側邊緣（面向下風向）與噴射氣流心相吻合，而且遙數百哩。圖五200mb與150mb間波型粗線顯然是對流層頂。

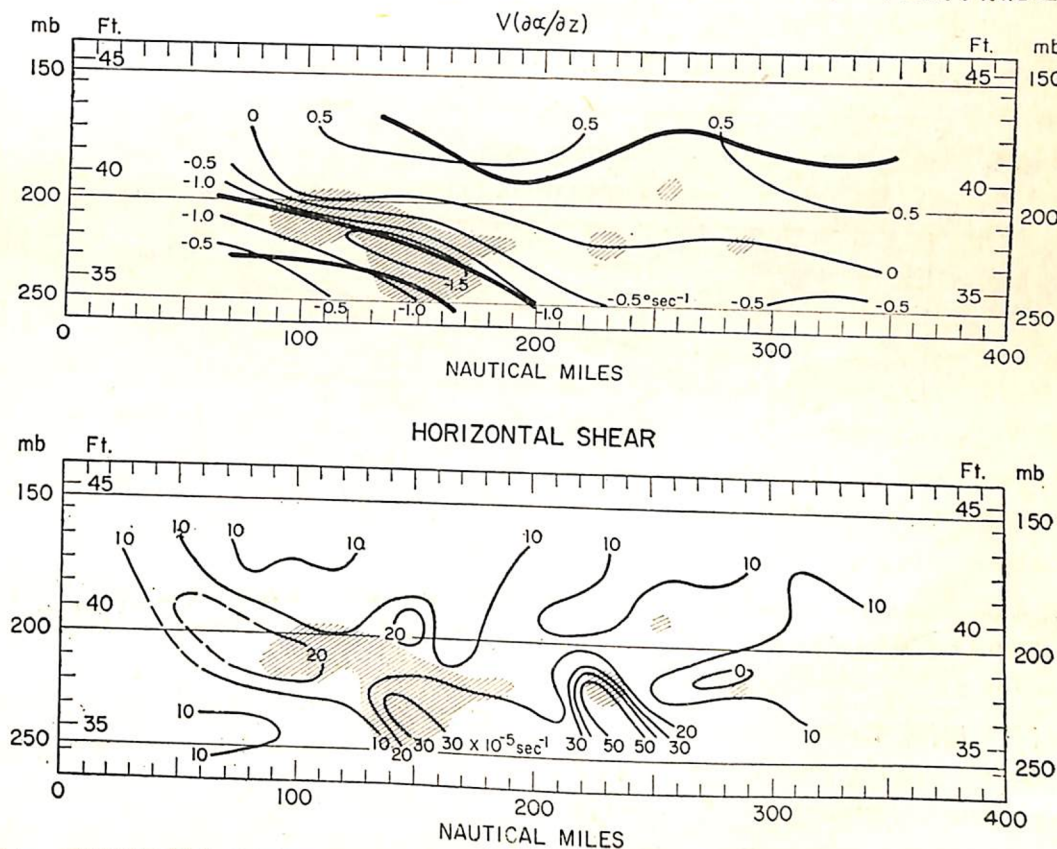
由圖四圖五之風與溫度場吾人可以計算風之水平與垂直切變量—— $\Delta v / \Delta n$ (Δn 為距離) 和 $\Delta v / \Delta z$ 以及溫度遞減率 $\Delta T / \Delta z$ ，穩定度 $g \theta^{-1} \Delta \theta / \Delta z$ ，以比較各亂流區域，另外吾人必須求得一種“量”以比較與噴射氣流相伴發生之亂流，和與水平（垂直）風向變化相伴發生亂流之關係，此“量”與風速及風向垂直變化成正比，亦即與此二者之積 $v (\partial x / \partial z)$ 成正比。雖然此積並非物理量，但已與上述各項同被計算。

如圖六所示，平方垂直風切場，即 $(\Delta u / \Delta z)^2 + (\Delta v / \Delta z)^2$ 獲得左下方主要亂流區之最大值。在噴射氣流心左方之中度亂流區內此量最小，而在噴射氣流心之南對流層頂無亂流區有非常大的值。熱力穩定度之結構亦非常有趣，熱力穩定度之“量”與溫度遞減率有密切關係，所以可檢查圖五而作適當之決定，對流層頂之上方穩定度有一相對大值（ 4 至 $5 \times 10^{-4} \text{Sec}^{-2}$ ），穩定槽上層之值為（ $2 \times 10^{-4} \text{Sec}^{-2}$ 至 $5 \times 10^{-4} \text{Sec}^{-2}$ ），圖五內其他各地之值接近 $1 \times 10^{-4} \text{Sec}^{-2}$ ，主亂流區適在槽內由穩定向上向下轉變為不穩定之變化層，亂流僅發生於低穩定度值區內之小部份。飛機報告顯示穩定與亂流間並無密切關係。

雖然，穩定度與亂流並無密切關係，但李察德遜數（Richardson Number）之計算仍極重要，李察德遜數即穩定度與風切平方之比值 [$R_i = (g \theta^{-1} d\theta/dz) / (\Delta u / \Delta z)^2 + (\Delta v / \Delta z)^2$]，穩定將使渦動減小，而風切將供給能量以維持渦動，通常吾人假定當 $R_i < 1$ (α 為一正量) 時即有擾動存在。圖六之主亂流區及次亂流區 $R_i < 1$ ，而不能令是滿意者為 $R_i < 1$ 之區域遠較亂流區為大。



圖六 沿飛機路徑之垂直剖面圖。上圖為平方垂直風切（單位 10^{-4}sec^{-2} ），下圖為李察德遜數。



圖七 沿飛機路徑之垂直剖面圖。上圖為 $v (\partial x / \partial z)$ ，風速之產生與風向之垂直改變（單位 deg sec^{-1} ）下圖為水平風切數（單位 10^{-5}sec^{-1} ）。

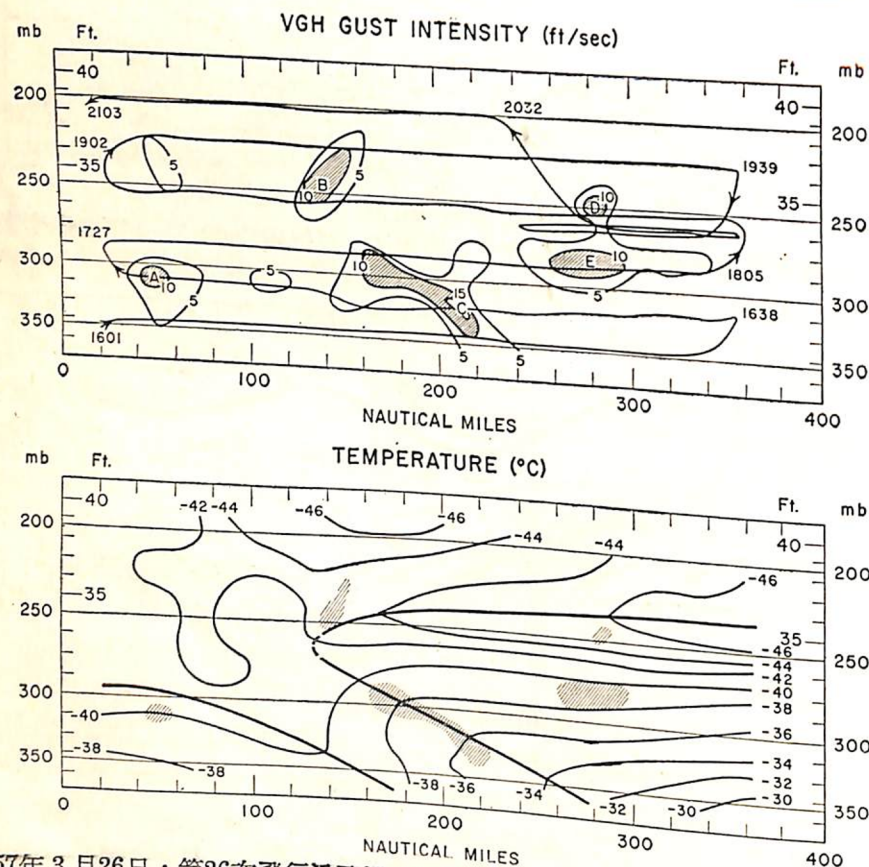
圖七 $\nabla(\partial\alpha/\partial z)$ 量有一大值與主亂流區相對應，但另一方面在噴射氣流心附近亂流區之 $\nabla(\partial\alpha/\partial z)$ 值甚小，而在噴射氣流心南方對流層頂非亂流區之 $\nabla(\partial\alpha/\partial z)$ 值為中度。水平風切場 $\Delta v/\Delta n = [(\Delta u/\Delta n)^2 + (\Delta v/\Delta n)^2]^{1/2}$ 有一最大值 $5 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ (約等於地轉偏向力之五倍) 位於噴射氣流心之左下方與次亂流區相吻合，這種不尋常的風切可發現於颶風之眼壁。亂流區之水平風切亦十分大，而噴射氣流心之南方對流層頂之水平風切則甚小。

以上特殊情形之結果可簡述如下，嚴重晴空亂流區與高空熱力穩定之集中(中範圍)槽相伴發生，此熱力穩定層內之垂直風切(特別是風向)很大，而此層之上，下溫度遞減率亦甚大，在亂流區及

其四周有中範圍之垂直運動。中度晴空亂流區與在噴射氣流心氣壓較低之一方大水平風切區相吻合。嚴重亂流與穩定層上限間之關係恰與1952年克提奈爾(Kuettner)之假說——波之運動能產生晴空亂流——相一致。另外吾人須注意者為風速風向切變大而李察德遜數值小之區域無亂流發生。

四、與強烈直線噴射氣流相伴生之亂流

1956—57年冬季B-47飛機曾觀測到風速193哩/時之強烈噴射氣流，其大的水平與垂直風切發生於廣大之區域，因之引起探討晴空亂流在噴射氣流內分佈之興趣。若以飛行時間之百分數表示亂流之量，則85%為無亂流，12%為輕度亂流，3%為中度亂流，這個百分數接近1956—57年連續飛行總數之平均情形，所以，這將不是吾人所預期的亂流與

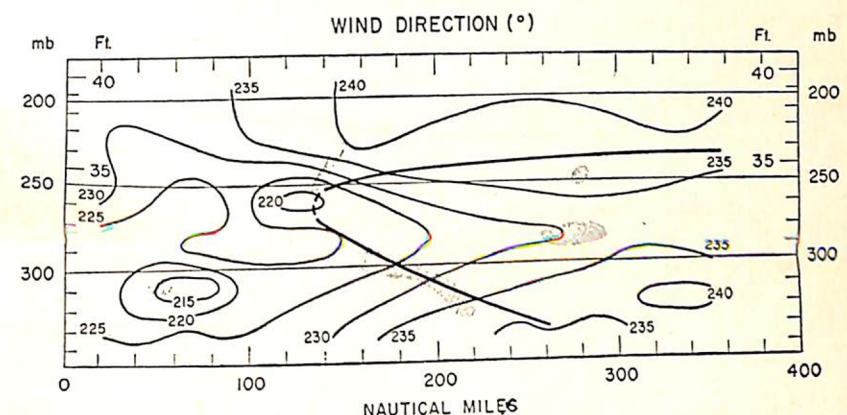
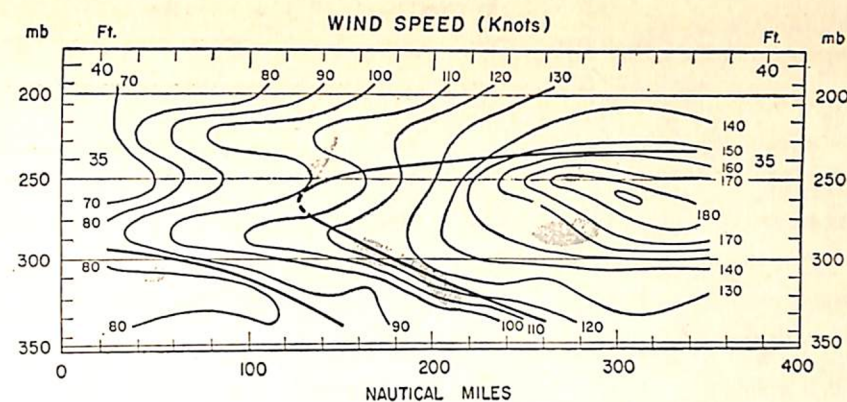


圖八 1957年3月26日，第26次飛行沿飛機路徑從噴射氣流旁低壓(左)至高壓(右)之垂直剖面圖。上圖為飛機路徑、時間(G.C.T.)及有陰影中亂流區之亂流陣風強度。下圖為飛機

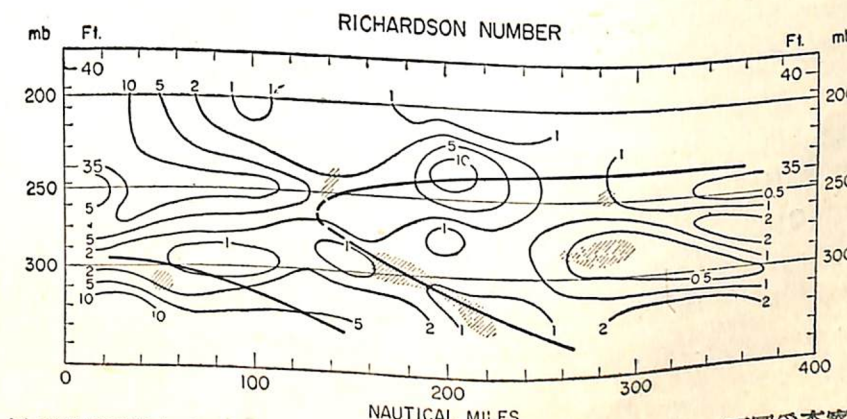
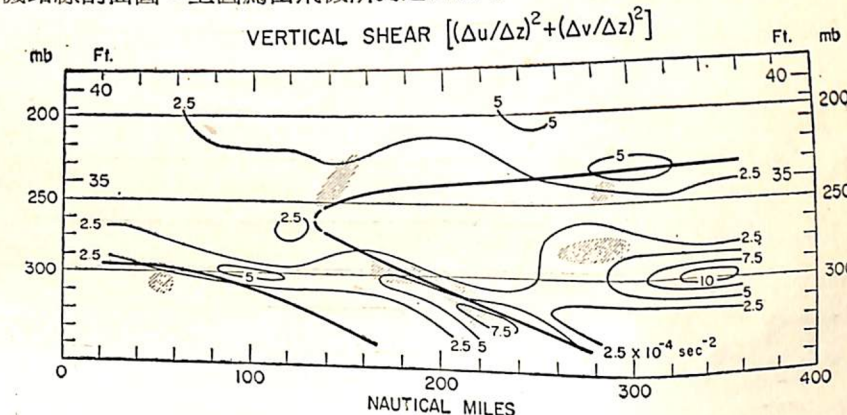
噴射氣流大的風切相伴發生的情形。

第26次飛行之等壓面為250mb，其飛行路徑在由西南向東北氣流內封閉等風速線之前緣。圖八示飛行路徑、時間及VGH亂流陣風強度，陰影處為中度亂流區，分別由字母A、B、C、D及E表示之

，C區為遭遇之最大陣風區(17呎/秒)，高度為29000呎。吾人由圖八可知主要亂流區位於穩定層之上限，顯然的，此上限與位於35000呎之對流層頂相連接(如圖之右半部)，而穩定層之下限為圖左半部之極地對流層頂。圖九示等風流線沿水平方



圖九 沿飛機路徑剖面圖。上圖為由飛機所測之風速(Knots)下圖為風向(deg)陰影區示中亂流。

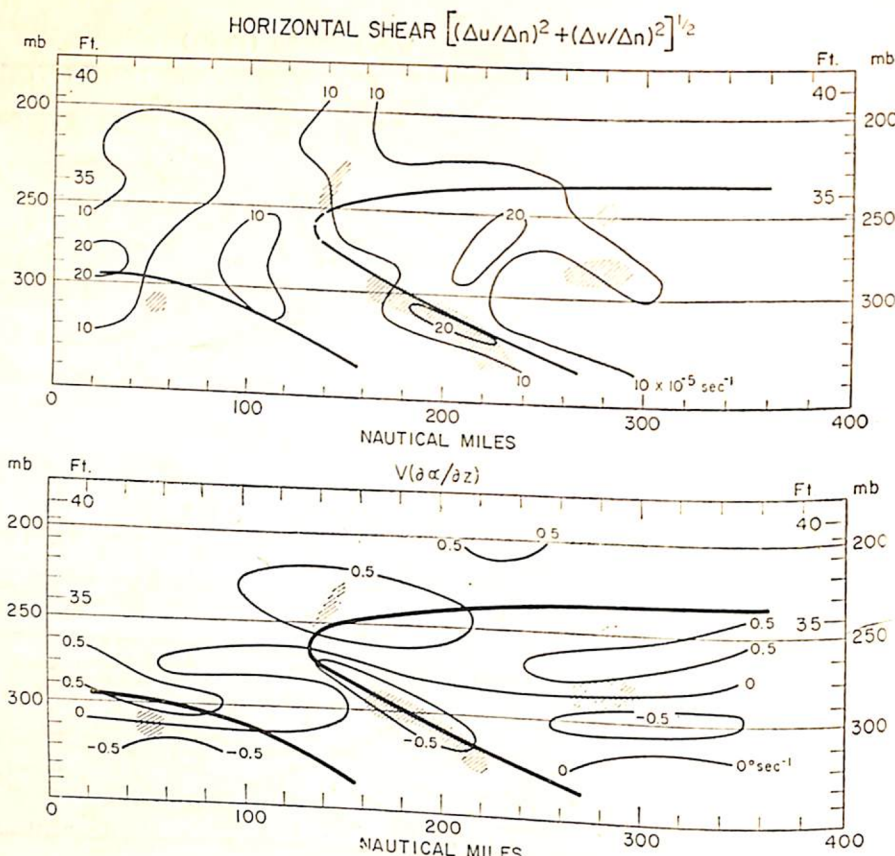


圖十 沿飛機路徑剖面圖。上圖示平方垂直風切(單位 10^{-4} sec^{-2})。下圖為李察德遜數

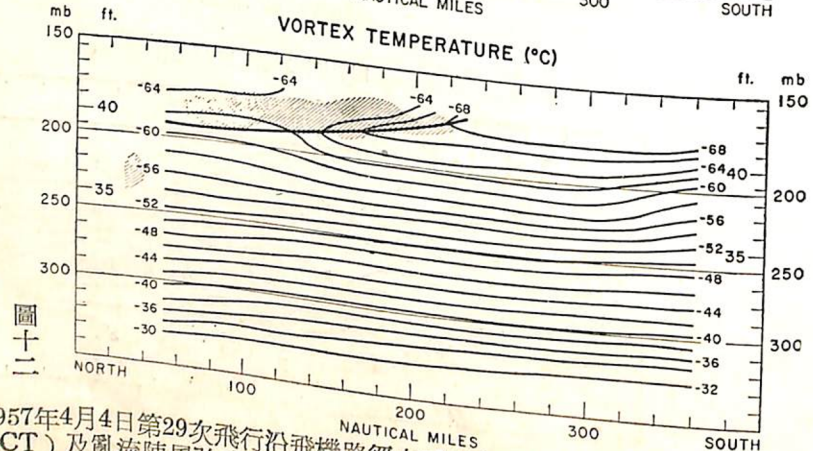
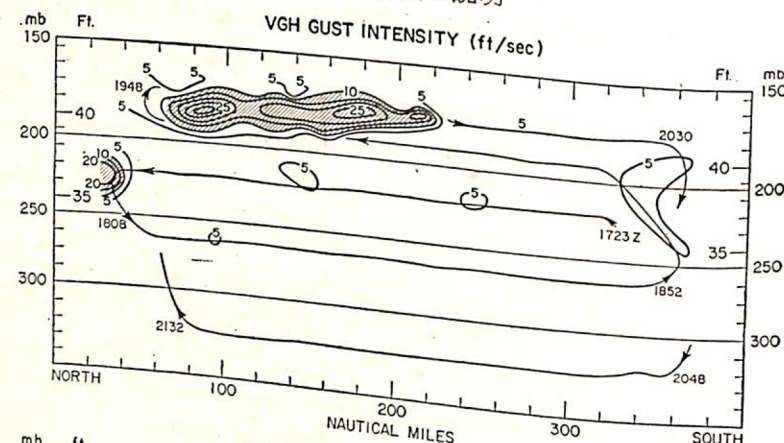
向伸展，在噴射氣流心之上下與上對流層界面之上限均有強烈之垂直風切，在噴射氣流之左方有兩個相當高風速等風速線伸入平流層，風向由噴射氣流心之 235° 轉變至圖左部分之 $215^\circ-230^\circ$ ，因此，這個區域經鑑定為出口，氣流趨於輻散，由圖八及圖九，吾人可知A區適在極地對流層頂之下，B區在對流層頂之上的穩定氣層中，C區為沿噴射氣流面之上限，D區及E區則分別在噴射氣流心之上、下方。

圖十示垂直風切之平方，亂流C區為一大風切區域，但二者配合並不太好，因在噴射氣流心下之最大風切區並無亂流。圖八所示不穩定之溫度遞減率為噴射氣流心右方32000與33000呎間之一 8.8°K/km 。噴射氣流心上下噴射氣流界面之上方，及接近圖左端之極地對流層頂等處之李察遜數值均低於一。亂流區C、D及E之 $Ri < 1$ 且該小值之 Ri 區域較亂流區域為大。在主亂流區C內發現負值，而同樣範圍之負值區域亦發現於噴射氣流心正下方數千呎之無亂流區。圖十一下部示水平風切，其最大值較圖七所示者為小，而且大風切區不與亂流區C完全吻合。

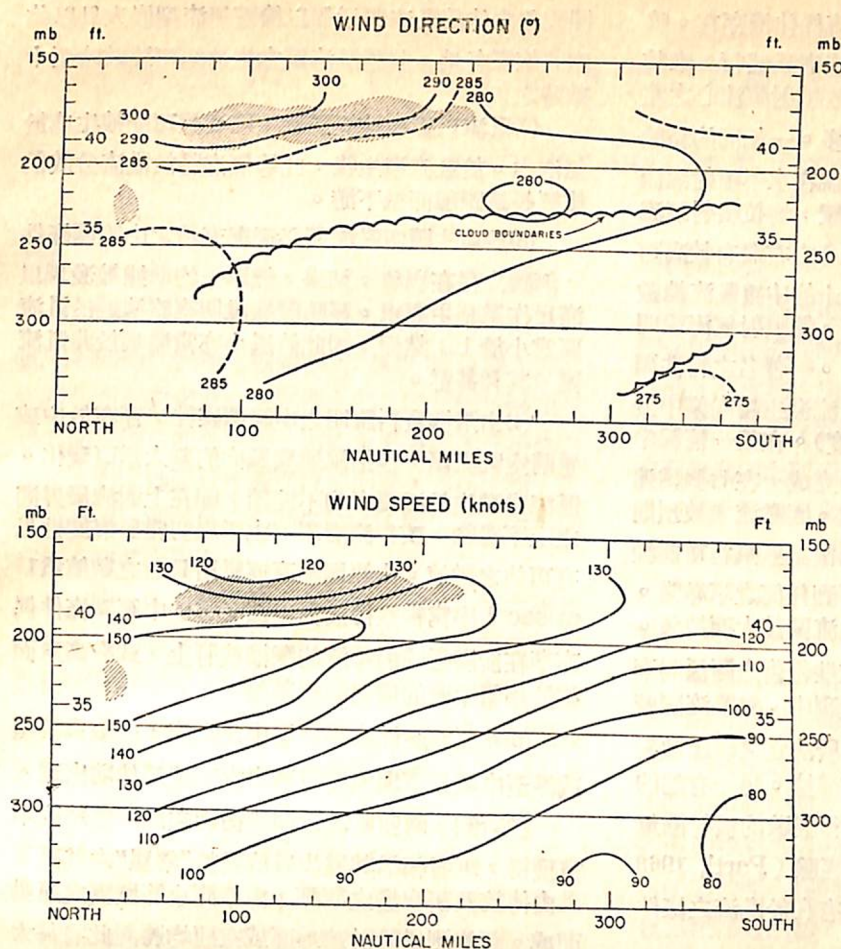
簡言之，強烈亂流並不與噴射氣流相伴發生，主亂流區C（中度）於位顯著高空界面之上限，亂



圖十一 同圖七說明



圖十二 1957年4月4日第29次飛行沿飛機路徑之垂直剖面圖。上圖為飛機路徑，時間（GCT）及亂流陣風強度。下圖為由飛機所測之溫度。粗實線為對流層頂。



圖十三 沿飛機路徑剖面圖。上圖為由飛機所測之風向。下圖為風速。陰影區為中及重亂流。

流區D、E分別位於噴射氣流軸之上方與下方，亂流區A、B之位置極接近對流層頂。亂流區與圖十及圖十一所示各量配合得並不特別好。

五、與反氣旋型噴射氣流相伴發生之嚴重亂流

在第廿九次飛行中，於新英格蘭上空每小時160 哩之反氣旋型噴射氣流內曾遭遇到嚴重亂流，此亂流之分佈相信即為此種類型噴射氣流之特性。圖十二及圖十三為亂流場、風場、溫度場，業為瑞提爾（Reiter）於1961年所分析。於噴射氣流心之南，垂直風切與水平風切均十分規則，水平溫度梯度微弱，溫度遞減率不穩定，有厚卷雲層，反氣旋風切甚大，足以發生動力不穩定。主要亂流區位於噴射氣流心上方之氣旋型水平風切（陣風33 呎/秒）內。由圖十二知亂流適發生於對流層頂之上方，由風場計算所得亂流區之 $v(\partial v/\partial z)$ 大如1.3，此值與第廿七次飛行所發現者相似。不管亂流區內穩

定的溫度遞減率，大的風切仍將使李察遜值接近於0.5。

簡言之，第廿九次飛行遭遇之嚴重亂流發生於一尖銳的高空脊前方之噴射氣流上方之對流層頂。

六、其他各次資料之簡述

除以上所討論之三種情形外，尚有二十次飛行，其所獲資料包括（一）四次飛行於明顯之低壓中所遭遇之小區域中度亂流，該等亂流與上空為穩定層之氣旋型風切相伴發生。（二）二次飛行通過坡度較小之低壓槽，遭遇輕度亂流。（三）六次飛行於小有彎曲之噴射氣流中，僅遭遇到小區域輕度亂流。（四）六次飛行於反氣旋型噴射氣流中，在噴射氣流心上方遭遇到中度亂流，以及在噴射氣流心以南與動力不穩定相伴發生之小範圍中度亂流。而噴射

氣流之兩側均有亂流。（五）一次飛行於無噴射氣流之尖銳低壓槽，遭遇到中度亂流。（六）一次飛行於離線下游之對流層頂，遭遇到中度至嚴重之亂流。

對這一連串飛行之時間來說，所遭遇到之輕度亂流約為12%，中度亂流為2.5%，嚴重亂流為0.2%。而這些亂流並不盛行於噴射氣流內。中或嚴重亂流之其他例證的特性詳細研究均所為高度企求者，無論何時當適當之觀測變為可用時。

七、與其他最近調查之比較

在二最近論文中，Colson(1961, 1963)均已論及由標準飛機於一為期數日之久的特有報告期獲得其亂流報告。從研究機比較其資料，這些報告有供給廣泛時空涵蓋之利。例如：各種圖表可顯示美國各地不同高度及已給的準備時間間隔之內之亂流出現或消失。Colson曾發現甚多段噴射氣流中無可感亂流。有關氣流曲度，彼發現其所佔之全部百分率約等於平直的氣旋性及反氣旋性氣流。然而，在數日

期之固定階段，有多達50%之亂流係伴槽存在。噴射氣流之右邊的亂流其強度較左邊者為盛行，唯其程度輕微。然而，Harrison却發現噴射氣流心之左所生成如右之嚴重亂流約五倍之多。一相同的結論為Briggs (1961) 所達成，彼發現在水平噴射氣流軸之下，幾乎所有的嚴重亂流例證，均位噴射氣流心之左，當水平噴射氣流軸上方心之右略有較高可能時。Colson曾發現約百分之二十的中重亂流總數之例證發生於山坡之有利條件下。雙噴射氣流說明11%之例證，而斷裂低壓僅有3%。一著名之特性顯示於 Colson 之研究中，乃為亂流發生趨向集中於固定的區域($2^{\circ}\frac{1}{2}$ 經度 $\times 2^{\circ}\frac{1}{2}$ 緯度)。在某一情況中，45%的飛行於十二時的階段中完成，在七個結連鄰近區之內報告有中或重型亂流。因亂流未被預期涵蓋全部量(即完全被測出)，故某些飛行可能從其上、下，或旁邊經過而未經歷到任何之不尋常。似此，此相當高的百分率說明亂流區甚大而持久。Rustenbeck (1963) 曾檢查這些報告之關係對李察德遜數由測風資料之決定而發現中、重亂流隨廣泛之李氏值而變。如此，由此法所決定之李氏數對亂流分析未顯示為一十足的可靠準據。另一有趣的考慮即一對北大西洋區有廣泛飛行經驗的噴射機駕駛員獲有槽脊和亂流獨立存在之經驗 (Partl, 1963)。此將導人懷疑，除山坡外，有利於亂流之條件海上陸上盡同。

八、飛機資料之見解

上述及甚多先期研究，顯示晴空亂流為一複雜現象。雖如此，作者於此仍不揣冒昧提出拙見數則，以與其他調查者們之經驗作比，此意見為：

(1)中或重晴空亂流區類多結合特有之中範圍現象，如噴射氣流、槽、脊及上對流層界間。此中範

圍現象之伴隨亂流顯示係以繪圖氣流型嵌入且以此型式旅經各地。此種亂流區之生命期可達數時至十數時之久。

(2)亂流以壓臨或經過發生區姿態可能被生成於氣泡中。於亂流發生後，此等氣泡將於亂流分散前旅經長遠距離而抵下游。

(3)於產生晴空亂流所必需與充份之中範圍條件，無獨立存在現象。結果，無單一的準據被發現以滿足作業利用需求。經驗證據說明李察德遜於亂流區常小於1；然而，因此值過小亦常發現於非亂流區故其利甚鮮。

(4)由飛機資料證明之中範圍條件，存在於中或重晴空亂流區，包括風速與風向的劇大垂直變化。亂流常發生於減溫率的不連續，即在上對流層界間之上下邊緣，或對流層頂。水平風切常呈氣旋性且有可估之數值。中範圍垂直運動所具有之數值為 1 m sec^{-1} 序常被察得於亂流區。這些中範圍條件偶亦存在於鄰近噴射氣流的深槽或脊上，或沿高空面位於相當平直的噴射氣流部份。

(5)在反氣旋性水平風切中之亂流，一般為輕型或輕至中型且不與溫度直減率之不連續伴隨出現。

就新知，晴空亂流之觀測彷彿在最近之將來不會獲得，筆者相信其進步只成就於“零星”之基礎。且由傳統及研究機之觀測，由觀測小範圍雲之運動而成。新的測量設計或地面或空運均將對此有甚大助益。在減溫率不連續下之波型運動生成之理論性研究，以風速風向而構成顯著風切，將有助於對晴空亂流現象研究獲致物理的洞察。(完)

(取材於1964年6月三卷三期美氣象學會發行 Journal of Applied Meteorology)

(上接第三十四頁)

置警報迫接近台灣時則每三小時即發佈一次預報，綜合各種客觀預報與實際之情形(圖十三)所示，由圖中平均數字看本中心之預報雖仍不免稍有差誤，但所差不大而甚獲上級稱許。

八、結語

1.“哈莉”為繼上月“黛納”之後又一次直接侵台之颱風，此二者皆以北面環流強且廣，故“黛納”過境時台北曾有46哩/時之強風，“哈莉”對台北出現之強風更近乎倍之。

2.本次哈莉颱風接近本省東部時，由於內圈環流不強，其颱風眼亦不甚顯著，故以本軍雷達觀測，均未見到有如以往明顯之眼存在，迄移至台灣海峽，副中心加深取代主中心時止，均屬如此。

3.“哈莉”颱風二十三至二十五日移行快速(平均時速20哩)此係高空導引氣流有所致，另外颱風中心環流以北面較強，則在東向氣流本身即足以增加其西行分力。

4.二十六日位於馬公附近之副中心，正式取代中央山脈東側之主中心後，西移緩慢，乃因此副中心一時尚未能完全取代主中心之環流，需在該地繼續加強，俟能源補足後才加速西行，由於此一停留影響所及，致使台北強風(34哩及以上之風速)維持達二十小時之久，且一度出現之82哩/時之陣風均有關係。

5.“哈莉”過台期間無論就局部或整個言，所降之雨量皆小，此點因其中心輻合不強，移行又快，故使水汽之集聚不够充分(完)。