

從玉山看大氣壓力變化

陳慶昌¹ 嚴明鈺² 王世宇¹

¹美國愛荷華州立大學地質大氣科學系

²國立中央大學大氣科學系

(中華民國九十五年六月五日收稿；中華民國九十五年十月十日定稿)

摘 要

從 1943 年設站至今，玉山氣象站已運作了六十年。由於玉山站設於海拔近四公里的高度，因此亦建立了一個副熱帶高海拔的長期地面觀測資料。在地面測站所觀測的變數中，同等於大氣質量的氣壓場具有許多自然界的時序變化，包括了全年（季節）、半年、季內、全日及半日等時間尺度。過去研究曾發現，氣壓的季節變化在青藏高原與在平地呈現反相的關係。有鑒於這個未解的現象及玉山測站的獨特環境，美國愛荷華州立大學（Iowa State University）與國立中央大學聯合組成一個科學團隊，廣泛地分析了台灣測站的氣壓資料，並針對氣壓的多重時間尺度變化發表了一系列的成果。為了向台灣氣象學界介紹這些科學發現，本文便將他們的研究整理成一個精簡而系統性的回顧。

對流層的下層對於地表加熱與冷卻的反應快於上層，而玉山站的高度已到達中對流層，玉山的全年氣壓變化因此與平地測站相位相反。類似的相位差異亦反映在氣壓的日變化（全日潮）上：平地的氣壓日變化領先玉山近 12 小時。在半年週期上，玉山與平地相位一致，前者的振幅比後者大。在半月週期上，玉山與平地相位亦相同，但前者振幅只有後者的一半。至於季內變化，二個主要季內模（30-60 天及 12-24 天模）在山頂與平地的變化一致，因為季內模的結構皆向上均勻延伸至 300hPa 層，遠高於玉山高度。這些不同時間尺度之氣壓變化的結構差異不但反映出大氣層的複雜結構，同時也提供數值模擬研究一個理想的驗證途徑。

關鍵詞：氣壓、時序變化、玉山

一、背景--玉山的氣象觀測

世界上著名的山岳幾乎都有氣象測站的設置，這些高海拔的氣象站得以提供許多與地面站不同的氣象與氣候資訊。台灣擁有一座海拔 3858 公尺的玉山氣象站，由於其獨特的環境與「東亞最高」的頭銜，近年來逐漸為民眾所知。從 1943 年設站以來，玉山氣象站雖歷經了二個政府，但高昂的經費及人力資源卻從未間斷地投注到這個高山測站。然而，如此辛苦地在玉山頂觀測氣象的意義為何？最初的目的就是為了觀測高空大氣。隨著時代演進，目前的高空氣象探測已由散布全世界的探空網所取代。儘管施放「探空氣球」至今已為習以為常的氣象作業，高山氣象站仍然具有其獨特的價值—即連續性的觀測。

在過去的二百年中，這個世界才剛經歷了一段摸索高空大氣的歷史。生活在地面的人類由於只感受到近地表的大氣，因此對天氣和氣候的觀察在很早以前即已出現，但對於「上天」的重要性卻遲遲未知。到了十七世紀結束後，歐洲科學家才開始對大氣的結構產生系統性的思考，並嚐試觀測高空大氣。受限於技術，歐洲人遲至十八世紀末才得以釋放由鋼琴線串聯的大型風箏真正「觀測高空」，再逐漸進步到二十世紀初的測風氣球（pilot balloon）方法，在這段期間的觀測也確實累積出許多高空風場的知識（Lewis, 2003）。到了今天，高空氣象的探測主力已由掛載儀器的探空氣球所取代。但無論如何，氣球的觀測效率仍受限於經費與人力，而且最多也只能間隔每數小時實施，無法密集又連續地觀察大氣微妙的變化。正因如此，長期設置的高山測站便顯得格外重要，除了可連續觀測與探空氣球相同的氣象變數外（如氣壓、溫度、濕度、風場等），高山測站

亦可獲得如能見度、雨量、蒸發量等其他變數的資料，觀測時間更依儀器不同可達每數分鐘甚至每秒鐘，成就更精細的氣象分析。

與其他高山測站相比，玉山氣象站的設置還有著獨特的歷史背景—戰爭。日本從 1868 年明治維新之後便致力追求西方科學，其中也包含氣象的發展。在 1900 年以前，日本人已能利用設置於日本本土、中國之西方國家租界及台灣殖民地的氣象測站資料，繪製每日的地面天氣圖，並進行東亞的天氣分析與預測（Lewis, 2003），逐漸掌握在當時亞洲社會仍畏之為天意的氣象。在台灣，日本人於 1933 年在海拔 2413 公尺的阿里山設置了『台灣總督府阿里山高山觀測所』之後，有鑑於台灣「新高山」的顯赫高度，再於 1943 年二次大戰時期，在海拔 3858 公尺的玉山北峰設置了「新高山氣象台」，定時收集對飛航天氣極為重要的高空氣象資料。由於當時探空氣球仍未普及於亞洲，日本氣象人員便利用緯度近似但高度不同的台南〔設於 1897 年〕、阿里山及玉山三個氣象站的觀測，進行大氣的「剖面分析」，以提供重要的戰時天氣情報（謝與郭，2004）。

從 1943 年設站至今逾六十年，玉山氣象站已累積了大量的氣象觀測資料，對於氣象研究而言，這些長期資料無異是珍寶。不過，自從為了戰爭目的而從事的玉山頂觀測，玉山站的角色即停滯在輔助預報作業的層面而已，至於同樣重要的高山氣候研究，則鮮少受到氣象學界的關注。事實上，高山氣象在半世紀以前就已受到世界各地學者的重視，例如北美落磯山脈的地形效應（如 Judson, 1965；Whiteman, 2000）、青藏高原的氣候研究（Reiter 等人，1987；Saha 等人，1994）或歐洲阿爾卑斯山的天氣變化（如 Whiteman，

2000)等,都有研究逐步建立山岳氣象的知識。然而,散在歐、美和亞洲的這些顯著山嶽都屬於幅員遼闊的山脈群,本身的存在已對周遭的氣候及天氣造成改變。玉山則不同,近四公里高的氣象站坐落於幅員只有南北400公里與東西150公里的島嶼上,鶴立於周圍的海面之中,如同一根探針伸入大氣對流層,相較於世界上其他的高山測站,這個特質可讓玉山站觀測到較為單純的高空大氣變化。雖然目前全球重新分析資料(global reanalysis)已廣受氣候研究運用,不過台灣的東西向距離尚未及重新分析資料的網格點寬度(約250公里),不可能由重新分析資料解析出島上氣壓的分布,因此傳統的測站觀測分析依然重要。

二、高山大氣特性—氣壓變化

在地面氣象站所觀測的眾多變數中,大氣壓力是最基本一項,不但能夠敏銳地感應大氣環流發展及天氣變化趨勢,本身也具有許多規律的時序變化:從日、月、季節甚至年與年之間的變化,都能夠由時間序列一探究竟。由於海陸比熱不同,夏季時大氣受陸地加熱使得地面氣溫比海面高,而密度比海面低,造成陸地氣壓比較低而海面氣壓較高;到了冬季則情況相反。因此,海陸之間季節性的氣壓調節與溫度變化成反比,這個現象塑造了傳統上季風的概念(Holton, 2004);若套用於亞洲陸塊之上,即是夏季的熱低壓與冬季的冷高壓。

其實,不單只有海洋與陸地能夠形成氣壓變化的對比,在廣大的陸塊上也存在著相似的大氣變化。van den Dool與Saha(1993)即發現,氣壓一整年的變化(年變;annual variation)在高海拔的山脈/高原與低海拔地區之間呈現相反的情

形:夏季時低海拔地區氣壓降低,但高海拔山區氣壓升高,冬季時則是平地氣壓升高而高山氣壓降低,其中最顯著的例子可由Saha等人(1994)所發現的青藏高原及周圍低地的對比來代表。高原上、下的氣壓年變除了呈現反相位之外,高原的氣壓變化幅度也明顯比低地小。Saha等人(1994)雖在當時推論高原頂的氣壓變化跟隨著650 hPa的大氣層,而這一層大氣的氣壓全年變化與低層相反,但未再進一步解釋其物理原因。玉山頂的年平均氣壓近似青藏高原的拉薩(640 hPa),亦接近Saha等人所提及的650hPa大氣,但是西藏是一個碩大的陸塊,而玉山是一個西太平洋島嶼,二者的氣壓變化是否會呈現與青藏高原相同的情形呢?如果是,那麼形成氣壓變化上下層相反的原因又是什麼?這些疑惑在科學文獻中尋無資訊,有釐清的必要。

有鑒於這些未曾開拓的研究領域,加上玉山獨特的地理環境,美國愛荷華州立大學(Iowa State University)與國立中央大學在十年前(1997年)開始的科學合作中,即專注於台灣氣象的研究,密集運用玉山和其他測站的資料進行氣候分析,首先便嚐試解釋Saha等人(1994)所留下的疑題。氣壓的全年(季節)變化源自於地球的公轉,而地球的自轉另外產生了一日24小時的氣壓變化,二者造就了自然界中最重要時序循環。除此之外,在季節變化中還存在著半年(semiannual)和季內(intraseasonal)變化,而日變化亦具有全日(diurnal)及半日(semidiurnal)二個主要的週期分量,這些時間尺度支配著氣候上的氣壓演變。因此,這二所大學的合作除了分析Saha等人(1994)所嘗試的年變尺度外,也針對氣壓在上述所有的時間尺度變化進行了一系列

的研究。他們發現，玉山頂與平地之間在某些時間尺度上的氣壓變化相反，但在某些時間尺度上卻呈現一致，顯示大氣的變化隨著時間尺度的不同具有顯著的結構差異。

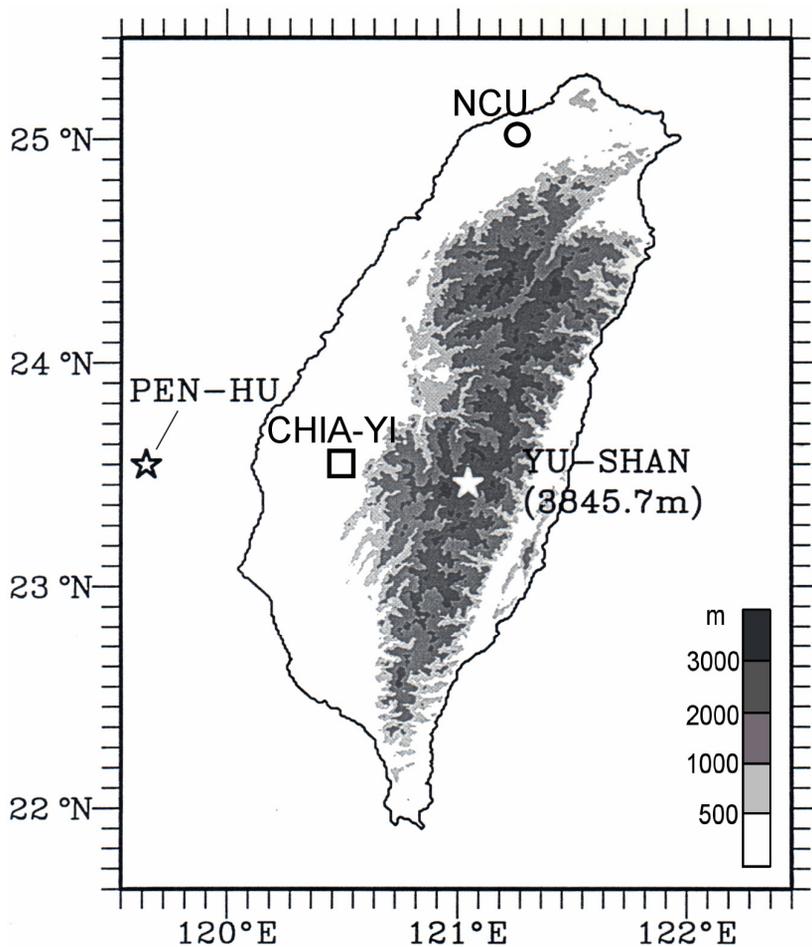
依照氣壓的時序性質，二校的合作分別對於氣壓的年變(Chen與Yen, 1999)、半年變化(Chen等人, 2000a)、季內變化(Chen等人, 2004)以及全日潮和半日潮變化(Chen等人, 2001; Chen等人, 1998)進行分析，綜合的研究結果已涵蓋了所有主要的時間尺度。由於每篇論文都在不同

的時間發表，至今有需要將這些成果整合成一份完整的研究回顧，同時也方便國內氣象學界運用此資訊。以下的回顧次序即按照這些不同的時間尺度排列。

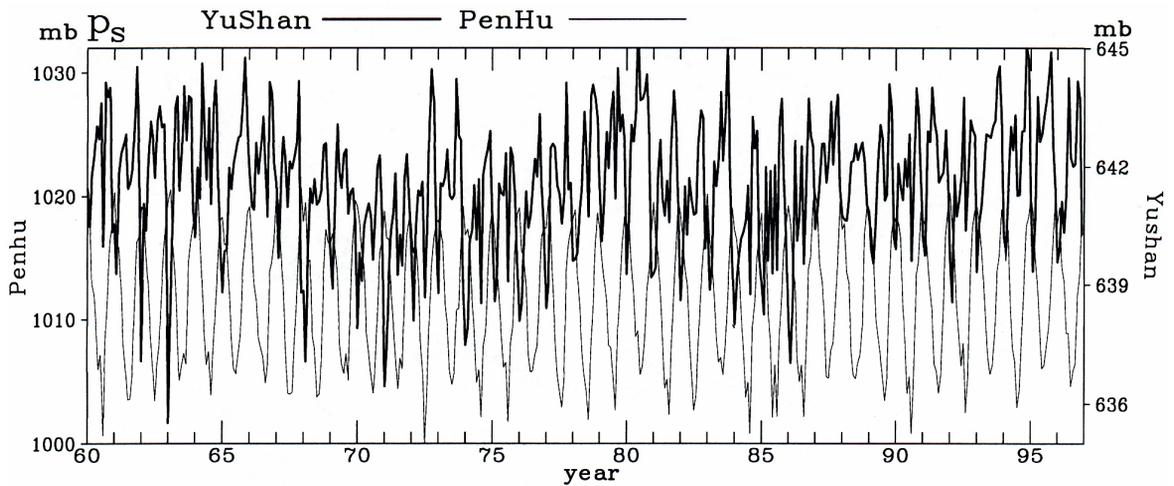
三、大氣壓力的特性

(一) 全年變化

台灣不但具有海拔 3858 公尺高的玉山氣象站，同時也擁有數個座落於外海島嶼的測站。爲了比較 Saha 等人(1994)所分析的青藏高原氣壓



圖一 台灣地理位置與地形分佈，地形的灰階說明標於右下角。文中使用的測站位置及英文名稱以不同符號標示於圖中。



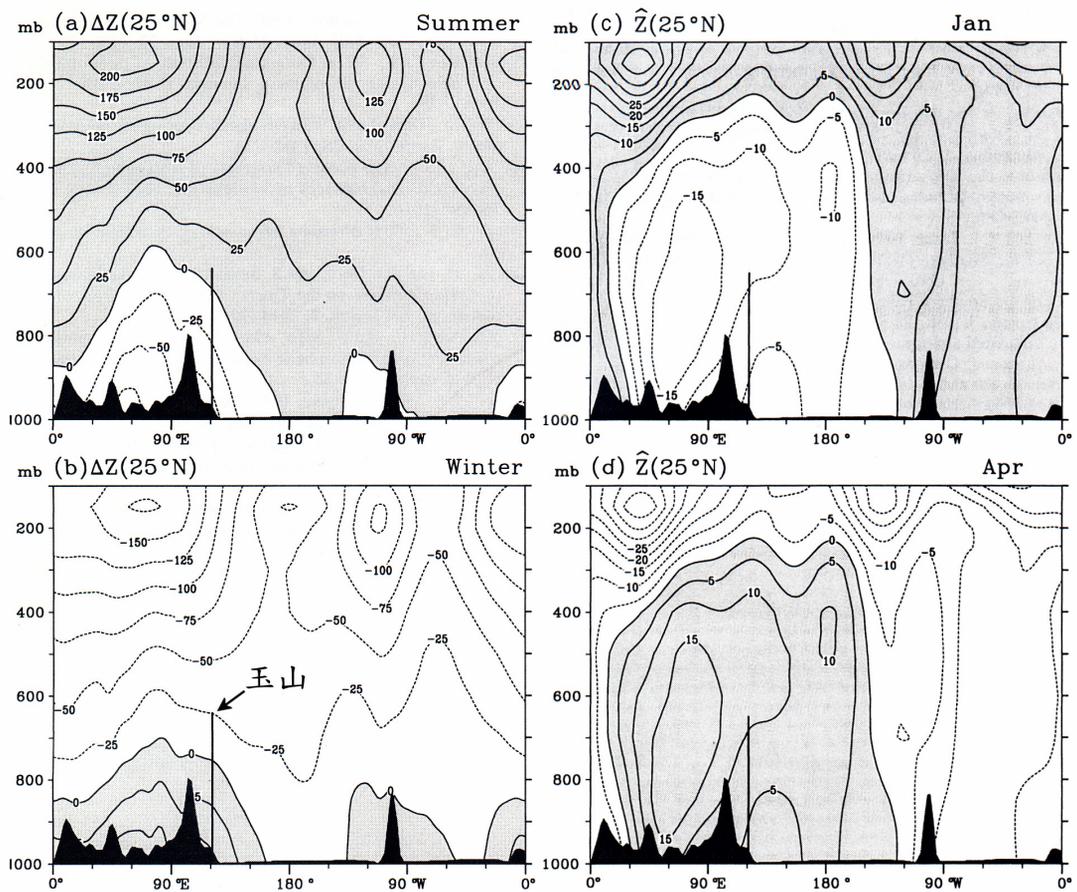
圖二 月平均地面氣壓從 1960 至 1997 年間在玉山（粗實線）與澎湖（細實線）的時序圖。

變化，Chen 與 Yen (1999) 利用玉山與澎湖測站作為高山與平地的對比。位於相似緯度的玉山與澎湖測站雖只相隔 100 公里，但一個位於中層大氣，一個位於海平面（見圖一），因此這二站最能突顯高度在測站大氣條件中的角色。由玉山與澎湖站每年的月平均氣壓時序圖（圖二）可發現，每當氣壓在玉山達到一年之中最高值之際（夏季），在海面上的澎湖站卻變化至最低值，二者呈現清晰而相反的季節振盪。圖二的 Y 軸刻度亦顯示，玉山的氣壓變化幅度小於澎湖許多，這一點也符合 Saha 等人(1994)在青藏高原所作的觀察。

台灣所處的東亞與熱帶西太平洋屬於季風區，也就是大氣上對流層與下對流層的屬性呈現相反的結構：夏季期間，東亞陸塊以上至 500hPa 以下屬於所謂的熱低壓，但 500hPa 以上則為高氣壓（即著名的青藏高原高壓）；冬季時，低層大氣演變成冷高氣壓，但高層的高壓移至南方，在東亞上空形成一道低壓槽。台灣位處於東亞與西太平洋的交界，並與青藏高原相隔 2000 公里以上，玉山

與平地的氣壓變化差異是否也受到青藏高原的影響呢？Chen 與 Yen (1999) 於是使用 NCEP (National Center for Environmental Prediction；美國國家環境預報中心)全球重新分析資料(Kalnay 等人, 1996) 來比較區域性的大氣在年週期變化上的結構。觀察圖三 a (三 b) 的重力位高度場垂直剖面圖可發現，夏季（冬季）時台灣被包含於東亞陸塊低壓（高壓）的東側邊緣中，所以低層大氣的重力位高度變化與東亞大陸是同步的：這個東亞低壓（高壓）在陸塊中心的厚度達到 600hPa，但逐漸朝兩邊降低至二側的洋面上，而玉山的高度剛好進入了相位相反的上層大氣中，所以與平地的氣壓呈現相反的全年變化。此外，玉山所處的 640hPa 重力位高度變化幅度也比較小，符合玉山氣壓年週期振幅較小的觀測。

值得一提的是，這種上下相反的重力位高度季節變化只存在於熱帶大氣層，至於中高緯度的氣壓/重力位高度變化則趨於上下層同步。圖三 a 與三 b 除了描繪歐亞大陸的低層高/低壓區之外，



圖三 橫切於 25°N 並移除年平均值的重力位高度剖面，繪於 (a) 夏季及 (b) 冬季，等值線間距為 250 公尺。橫切於 25°N 的半年週期分量之重力位高度剖面圖，繪於 (c) 一月和 (d) 四月，等值線間距為 5 公尺。玉山由繪於 120°E 的粗實線代表 (b 圖箭頭所指)。

在東西向距離較窄的北美洲上空也顯示了尺度較小的低層高/低壓結構，證明低層大氣的年變的確反應自陸塊的加熱。Chen 與 Yen (1999) 的分析除了證實台灣高山與平地的氣壓變化具有與青藏高原相似的情況，亦解釋了這種大尺度反相變化的成因。

(二) 半年變化

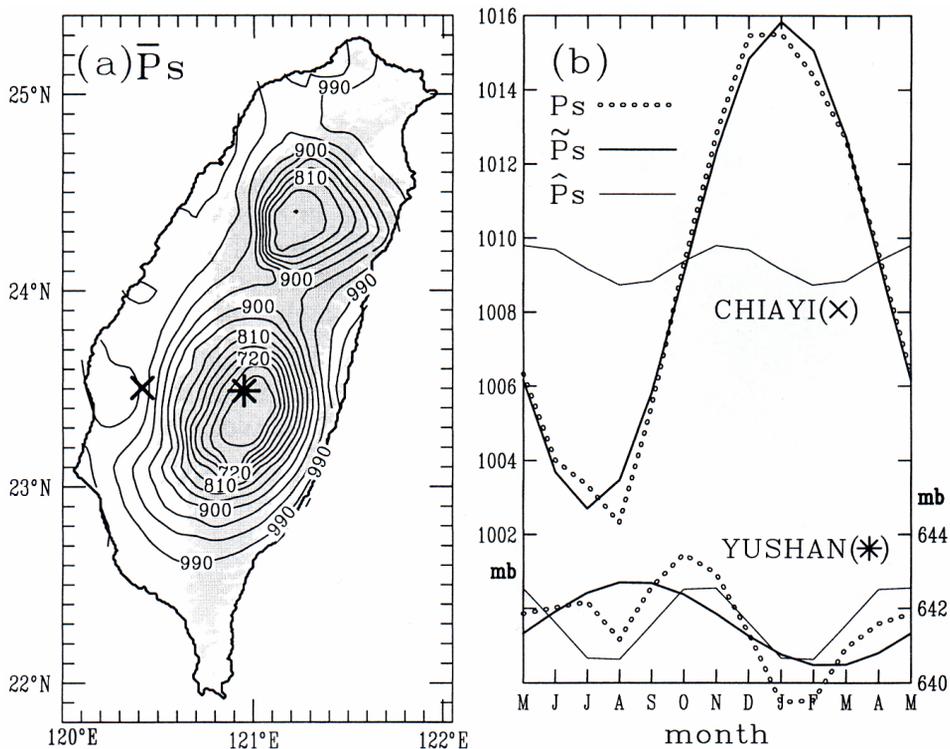
在發現了玉山與澎湖的測站氣壓存在著年變化上的差異後，Chen 等人 (2000a) 進一步研究台灣全島測站的地面氣壓分布，並以分解時序周

期的方式來探究全年與半年週期的氣壓振盪分量。首先他們分析 59 個分布於全島的測站氣壓資料，建構出二維的地面氣壓結構，圖 4 a 即展示這 59 站的分析結果。台灣的地形由數個山脈群所組成，其中雪山山脈與南中央山脈分別構成北部與南部各一個高峰群，圖 4 a 的地面氣壓分佈顯示二個低壓中心正好符合這二組高峰群；玉山及嘉義分別處於最低及最高值之中，兩者的氣壓在 50 公里中相差達 350mb。

Chen 等人 (2000a) 隨後運用傅立葉 (Fourier)

分析，將圖四 b 之玉山及嘉義站的月平均原始氣壓時序（虛線）分解成全年週期（粗實線）與半年週期（細實線）二個分量，並將這些時序線條重疊繪製以利比較。圖四 b 透露出一個有趣的現象：如前述，二測站的氣壓全年變化在幅度方面為嘉義遠大於玉山，而相位上二者幾乎相反。不過，半年週期的振幅卻是玉山略大於嘉義，而二者相位接近（只相差一個月）。由玉山站的原始氣壓時序線已可窺出半年週期的成分，但嘉義站的氣壓時序則受年週期分量支配，需要經由濾波分析才能突顯其半年週期的變化量。這個現象意味

著大氣層的半年週期與全年週期有著不同的結構，因此 Chen 等人（2000）以全球重新分析資料分析大氣的半年週期變化結構。圖三 c 與 d 分別表示重力位高度場的半年週期分量在一月和四月的東西向剖面（一月及四月分別表示半年振盪的最低值及最高值），重力位高度場在 200hPa 以下具有明顯的單一波數系統（即正負值區域各佔全球的一半），與過去研究所分析的半年週期結構相似（Wikle 與 Chen，1996）。不同於全年週期變化的振幅只於大型陸塊上較明顯，一月的低壓區（圖三 c）及四月的高壓區（圖三 d）在東西方向



圖四 (a) 59 個地面測站的年平均氣壓分析，嘉義 (X) 及玉山 (*) 站位置標示於圖中，淺灰區域表示 500m 以上的山區；(b) 嘉義 (上) 與玉山 (下) 月平均氣壓的原始 (虛線)、年週期 (粗實線) 與半年週期 (細實線) 之氣候值。

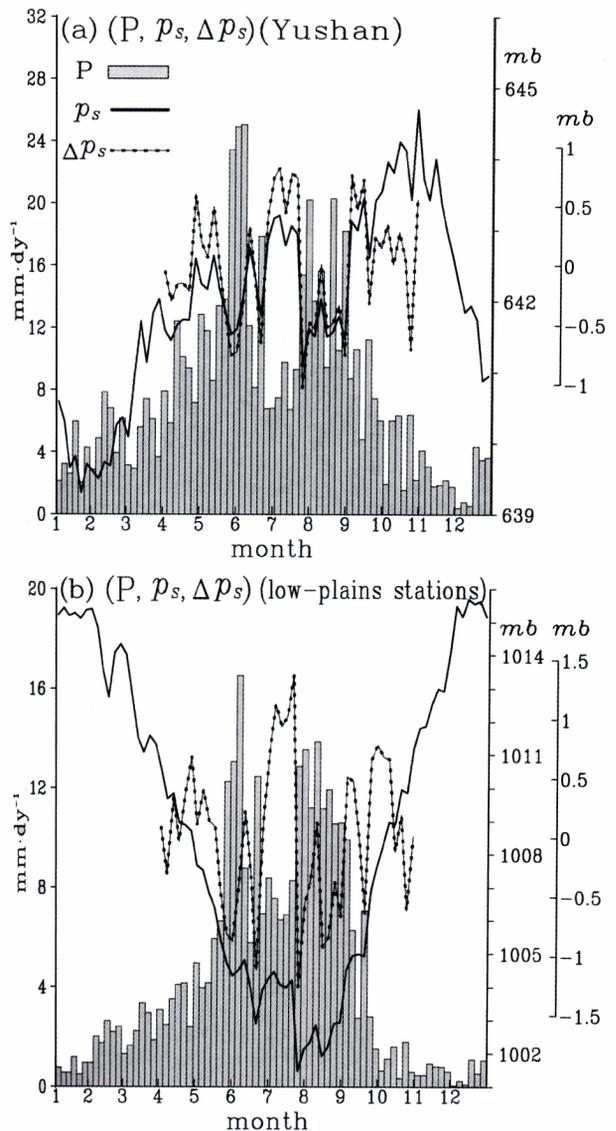
的尺度涵蓋了亞洲與太平洋，等於半個地球。除了相位之外，重力位高度的振幅自地面隨高度增加，至 600-500hPa 層達到最大幅度，因此玉山氣壓的半年週期振幅應該會高於嘉義，這個結構呼應了二測站的觀測結果（圖四 b）。除了玉山之外，Chen 等人（2000a）也指出，所有台灣 2000 公尺以上的高山測站都反映出與玉山站類似的氣壓變化特性。

(三) 季內變化

亞洲季風變化除了上述規律的全年/半年週期之外，從環流系統與降雨量之中都能觀察到明顯的季內振盪（intraseasonal oscillation）。季內振盪的發現比較晚，氣象學家經由對印度季風的研究，發現了二個顯著的季內模（intraseasonal mode）：一是由赤道往北推進的東傳 30-60 天模（如 Krishnamurti 與 Subrahmanyam，1982），二是自熱帶西太平洋向西傳遞的 10-20 天模（如 Murakami，1976）。這二個季風模的組合不但支配著印度季風的雨水及南海季風的生命週期（Chen 與 Chen，1995），亦對於東亞夏季天氣有著顯著的調節作用（Lau 等人，1988；Chen 等人，2000b；Chen 等人，2004）。那麼，季內振盪對於台灣的衝擊是什麼呢？由於在文獻中尋無妥切答案，Chen 等人（2004）在研究東亞夏季季風降雨的變化時，一併探討了季內振盪對台灣天氣的影響。

Chen 等人（2004）利用玉山測站與綜合五個平原測站（梧棲、台中、嘉義、台南、高雄）的觀測，繪製了山頂（圖五 a）與平地（圖五 b）之氣壓（實線）及雨水（柱狀圖）的五日變化氣候值，並套配濾除全年與半年分量後的氣壓餘量以

表示氣壓的季內尺度變化（細點線）；因為台灣週遭的季內尺度季風模只於暖季〔5-10 月〕較為明顯，因此在 11 月至 4 月的冷季我們將季內尺度變

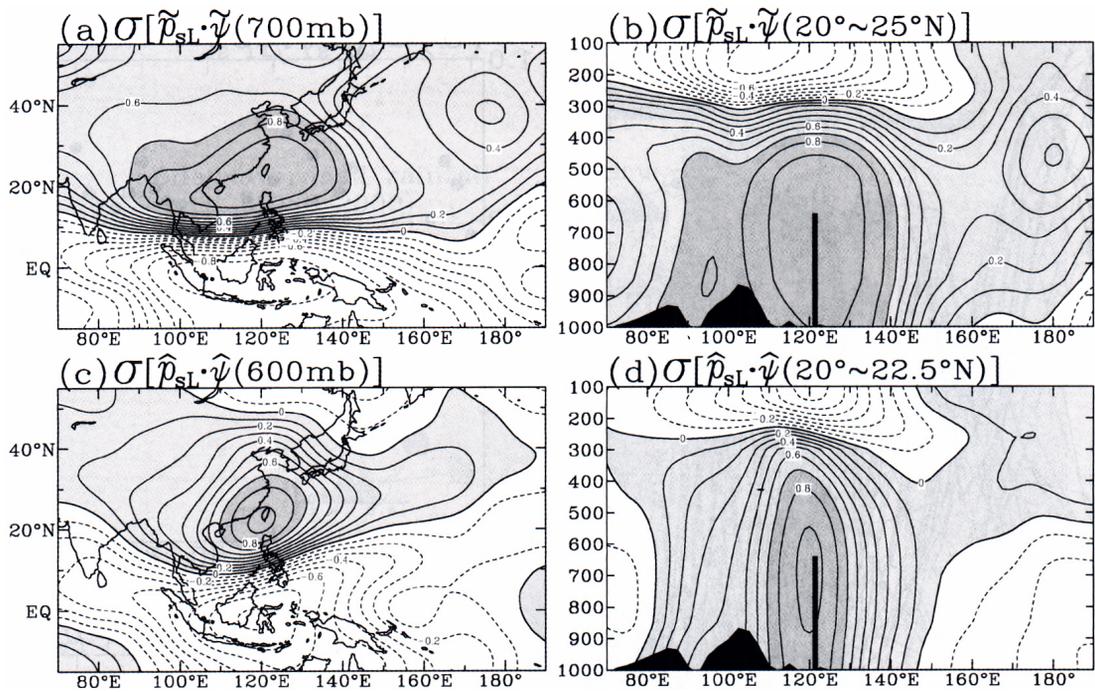


圖五 (a) 玉山與 (b) 平地五個測站（嘉義、台南、高雄、台中及梧棲）平均後的雨水（P；柱狀圖）、氣壓（ p_s ；實線）及移除年及半年週期後的氣壓餘量（ Δp_s ；虛線）。

化的時間序列予以省略。圖五的氣壓變化顯示二種時序變化的特性：1) 除了全年與半年的變化週期之外，氣壓另外具有一個 1-2 個月的週期（如七月至八月的氣壓上升與八月至九月的氣壓下降），以及一個更短（約半月）的週期振盪，二者正好符合 30-60 天及 12-24 天的季風模週期；2) 雖然氣壓的全年變化呈現如本節第一小節所述的相反相位，但在季內變化方面卻是山上與山下一致。同時，圖五也表示了氣壓升高（降低）伴隨著雨水的減少（增加）的關係，雖然山下的降雨比較集中於五月中到九月的時段，山頂與山下的雨水季節變化可算是同步。

隨後，Chen 等人（2004）進行每年氣壓季內變化的相關（correlation）分析，經比對自 1979

至 2002 每年的氣壓時序，發現 30-60 天及 12-24 天的季風模在玉山及平地之間的相關係數（correlation coefficient）平均值高達 0.9，證明山上與山下的季內氣壓變化幾乎完全同步，這個現象意味著大氣的季內變化結構可能自地表延伸至遠高於玉山頂的高空。運用測站與重新分析資料，Chen 等人（2004）緊接以二維相關分析建構出季風模的結構：將每年濾波後的氣壓時序組合起來，再利用玉山的氣壓時間序列「相關聯於（correlate）」重力位高度場之每一個網格點的時間序列；也就是說，每一個網格點的數列長度為 184 天 x 24 年 = 4416 天，最後得到一組二維空間的相關係數分佈。圖六 a 與 b 分別為 30-60 天模之氣壓與 700 hPa 流函數的水平剖面與垂直剖面



圖六 30-60 天週期分量的玉山氣壓時間序列與流函數場之間於(a)700mb 及(b)20°-25°N 垂直剖面的相關分析。(c)及(d)除了是 12-24 天週期的分量，其餘和(a)及(b)相同。等值線間距為 0.1。

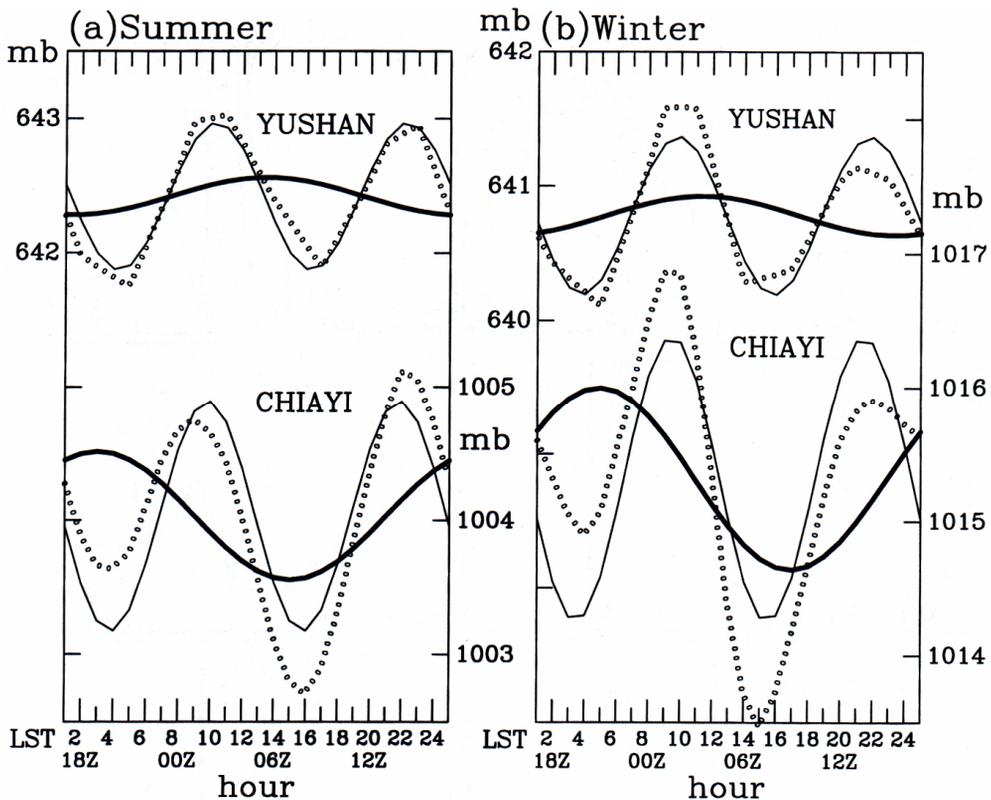
($20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 平均)的相關係數分佈,表示當 30-60 天季風槽/脊系統經過台灣時,其低壓結構可向上延伸至 300 hPa,達玉山高度的一倍以上。至於 12-24 天模,雖然其水平結構的範圍較小(圖六 c),但垂直結構則更深厚,向上伸入一萬公尺的高空(圖六 d),因此解釋了玉山與山下的季內變化在相位與振幅上皆呈現一致的原因。

(四) 日變化

大氣除了季節演進之外,由地球自轉驅動 24 小時日變化也同樣地顯著,而日變化中最重要的時序分量為日循環及呼應潮汐力的半日週期。對流層的日變化垂直結構引起了 Riehl 與

Haurwitz (1982) 的注意,在研究 GATE (全球大氣研究計畫之大西洋熱帶實驗)的探空資料時,他們發現對流層的日變化具有上下相位錯開的現象。雖然現今的全球重新分析資料具有六小時的時間解析度,要建構三維空間的日變化結構已經容易許多,不過在相信重新分析資料的結果之前,我們仍需要比對實際的觀測資料以驗證。

由於玉山與嘉義測站特殊的地理條件,Chen 等人 (2001) 最後仍以這二站進行主要的資料分析,並使用傅立葉分析過濾出氣壓的全日潮與半日潮。圖七 a 與 b 分別表示二測站在夏季與冬季的氣壓日變化氣候值,實際的氣壓變化(虛點線)



圖七 玉山(上)及嘉義(下)的每 24 小時長期氣壓平均,虛線為總量、粗實線為全日週期分量、細實線為半日週期分量,計算於 (a) 夏季及 (b) 冬季。

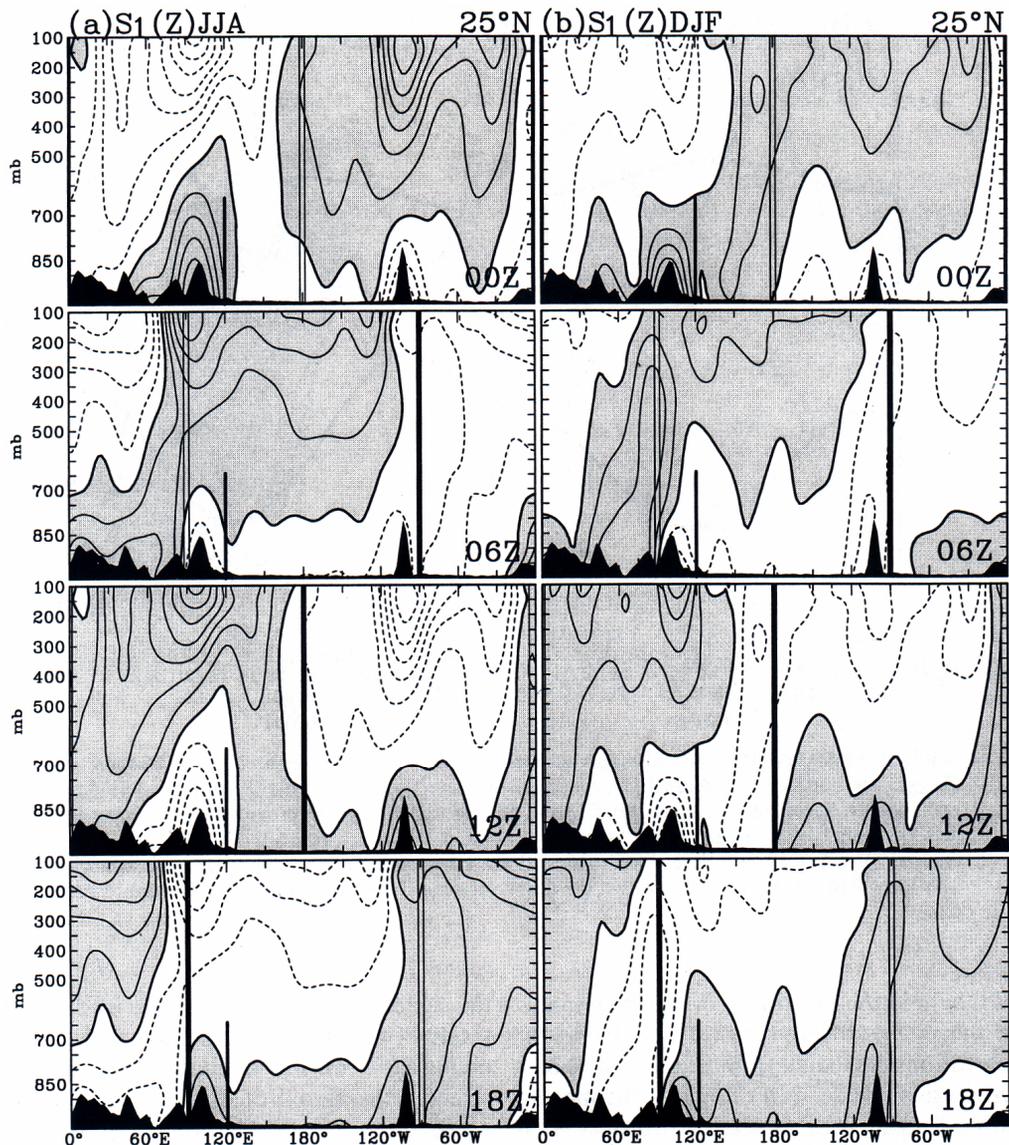
具有明顯的雙波峰、雙波谷結構，反應出典型的半日潮，顯著的半日訊號亦暗示著半日潮支配台灣的氣壓日變化。單純的半日潮（細實線）具有山上與山下同步的相位，只是玉山的幅度稍小於嘉義。全日潮（粗實線）則呈現較大的不同，玉山與嘉義不但呈現相反的相位，亦具有不同的幅度，嘉義的全日潮振幅遠大於玉山，表示山頂氣壓的日循環不甚明顯。若比較全日潮的最大值，平地的嘉義發生於凌晨三點，而玉山則發生於下午二點，全日潮在低海拔的嘉義足足領先玉山將近 12 小時。同時，全日潮也具有季節上的差異，這點可以從比較圖七 a 與 b 中窺知：冬季玉山的相位比起夏季提早了三小時（從 14 LST 到 11 LST），嘉義則晚了一小時，使得二者之間的差距從夏季的近 12 小時縮短到只有約 6 小時。

為了解釋這二個測站所顯示的氣壓全日潮差異，Chen 等人（2001）分析重力位高度場的全日潮【 $S_1(Z)$ 】以觀察大氣的全日潮結構與台灣測站的關係。夏季每六小時的 $S_1(Z)$ 剖面展示於圖八 a，圖中正午太陽位置以垂直空心實線表示，午夜則標示為垂直粗實線，以利比較。圖八 a 顯示全日潮單一波數的結構（尤其在低層大氣），對應著地球日夜各半的特性，而 $S_1(Z)$ 的傳播方向亦隨著日照向西行進。無論地表特徵為何，地球表面受熱及冷卻皆比空氣為快，因此近地層的大氣會比上層先行受熱，造成上下不同相位的溫度升降，進而帶動不同步的氣壓變化。舉例來說，06Z 相當於台灣的下午二點，正是午後最炎熱的時刻，此時台灣附近的地表高溫使得近地面的氣壓降低，由圖八 a 的 06Z 情況可知，近地面（850mb 以下）的大氣從東亞直到太平洋皆為低氣壓，但

是上空則仍然為高氣壓；至於夜晚的情形則可反推得知。這些現象在冬季（圖八 b）顯示類似的結構，不過低層變化的厚度卻增加了一些（見 06Z 與 18Z），使得玉山及平地的氣壓差異減小，這點符合圖七 b 的觀測結果。

此外，廣大的陸塊或山岳會增強對空氣的加熱作用，因此 $S_1(Z)$ 受到加熱與冷卻的幅度在東亞陸塊與台灣附近最為顯著（圖八 a）。雖然曾有研究指出，地表輻射加熱及擾流在激發全日潮的作用中並不重要（Chapman 與 Lindzen 1990），圖八的 $S_1(Z)$ 結構卻顯示低層大氣的變化情形與早期理論不同。但無論如何，全日潮擁有地表領先於上層大氣的相位差結構卻是不爭的事實。回到台灣現場，無論是冬季或夏季，玉山與嘉義之間全日潮的相位差異正好對應圖八的 $S_1(Z)$ 。在振幅方面，玉山頂的高度位於整層大氣中變化幅度最弱的區域，越接近地表 $S_1(Z)$ 變化幅度越大，所以嘉義的全日潮振幅大於玉山達三至四倍之多。

至於半日潮的部份，為何山頂振幅小於平地的原因至今仍不清楚。過去研究指出，熱帶大氣層的半日潮幅度應大於全日潮（如 Haurwitz 與 Cowley 1973），不過 Dai 與 Wang (1999) 卻從地面測站的資料中發現，半日潮與全日潮的振幅是相似的，而且在熱帶陸塊上，全日潮的幅度甚至大於半日潮。從 Chen 等人 (2001) 的測站分析中可發現（圖七），Haurwitz 與 Cowley (1973) 的觀察的確適用於玉山，而 Dai 與 Wang (1999) 的檢驗則近似於嘉義。換個角度來看，台灣的測站分析卻得以綜合過去研究對於氣壓日變化的觀測結果。



圖八 重力位高度的全日潮垂直剖面（橫切於 25°N），平均於 (a) 夏季與 (b) 冬季。由上而下為每六小時的時序分布，時間標示於右下角。等值線間距為 5 公尺。玉山由繪於 120°E 的粗實線代表，而正午太陽位置及午夜分別由垂直空心線及粗實線標示於所有圖中。

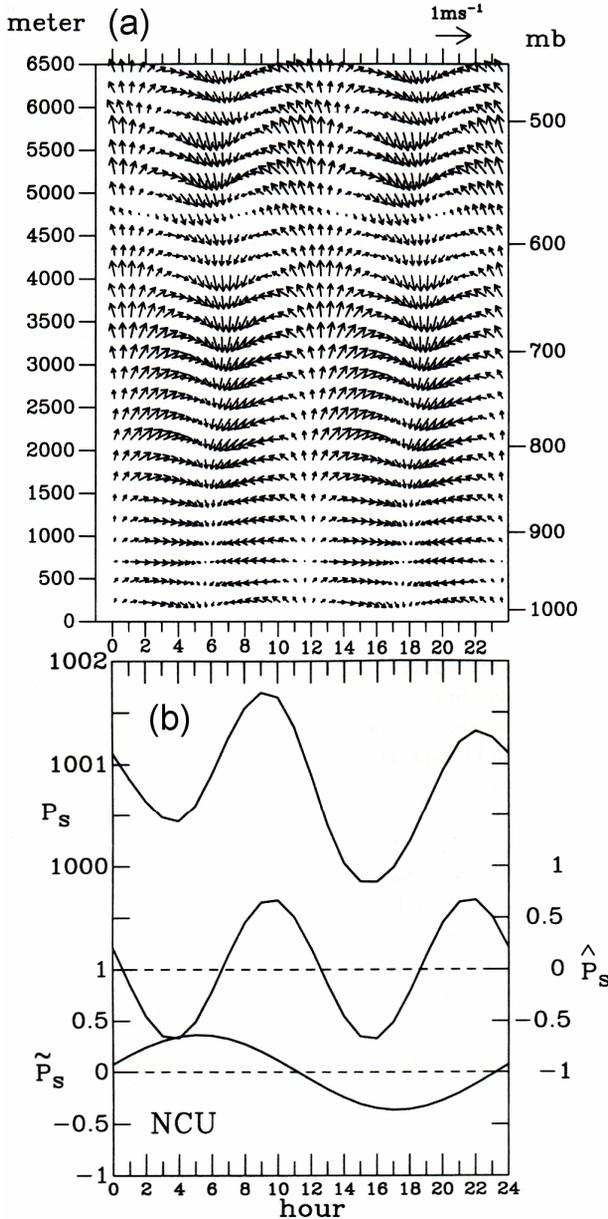
(五) 風場的半日潮

於前一小節我們提到了半日潮對於台灣氣壓的影響遠大於全日潮，這麼明顯的大氣變化是否也影響這氣壓之外的氣象變數呢？早在進行氣壓分析以前，Chen 等人（1998）即運用設於中央大

學的晴空都普勒剖風雷達（pulsed Doppler clear-air radar wind profiler；簡稱剖風儀）來檢視半日潮的結構（觀測位置標示於圖一），這具剖風儀對於 6500 公尺以下大氣的剖析尤其精細。由於過去探究半日潮的研究多半只分析氣壓或重力位

高度 (如 Riehl 1979), 垂直風場的探測直到 1980 年代結束之際才受到嘗試 (如 Whiteman 與 Bian 1996)。有感於這具剖風儀的研究潛力, Chen 等

人 (1998) 首先研究風場氣候, 合成過去共 319 日、每隔半小時的有效探測資料, 經由傅立葉分析瀘出風場的半日週期分量, 其結果展示於圖九。



圖九 中央大學剖風儀的 (a) 每半小時風場的長期平均半日潮之剖面, 及 (b) 中央大學地面氣壓的日變化總量 (頂端)、全日潮 (最底) 與半日潮 (中間) 分量。

半日週期的風場振盪結構清晰地顯示於圖九 a 之中, 在 6 公里以下的大氣, 風場的擺盪尤其明顯。Whiteman 與 Bian (1996) 曾對於類似的風場半日振盪提出了一個簡單的動力模式: 在慣性振盪 (inertial oscillation) 的理論下, 東 (西) 風分量的半日風場須伴隨著氣壓的負 (正) 振盪。比較於圖九 b 中央大學地面氣壓的時序線可得知, 上空的東風分量確實伴隨著氣壓下降, 而西風對應到氣壓上升, 剖風儀在北台灣的觀測符合 Whiteman 與 Bian (1996) 的結果。台灣雖然屬於副熱帶島嶼, 不過其氣候卻受到冬季東北季風及夏季西南季風的支配, 二者具有截然不同大氣環境, 也與 Whiteman 與 Bian 所分析的北美洲有很大的不同。然而, 位於台灣的剖風儀所觀測的半日潮結果卻與北美洲的情況一致, 這表示對流層中的半日振盪不具有顯著的空間變化, 大氣的半日潮結構應是均勻一致地分布於全球。

四、總結

玉山氣象站除了身為東亞第一高的氣象測站外, 它的實際價值與貢獻為何? 除了輔助天氣預報之外, 玉山長期以來累積的觀測已建立了一個理想的高山氣候資料庫。在過去數年中, 這份珍貴的資料輔助了一系列由愛荷華州立大學與中央大學的國際合作研究, 以探索大氣壓力的性質。Chen and Yen (1999)、Chen 等人 (2000a)、Chen 等人 (2001) 及 Chen 等人 (2004) 等連續的研究成果從玉山測站出發, 探討了大氣壓力在各種時間尺度的變化特性, 並結合大尺度的背景環流

來解釋各種地面現象與大氣結構的關係，實際提昇了玉山氣象觀測在學術上的能見度及價值。本文回顧這些研究成果，並根據時間尺度依序整理其結果如下：

- (1) 玉山頂的氣壓呈現與平地相反的年變化，這個反相的特性主要來自於年循環的分量。因為台灣處於亞洲季風環流的東緣，大氣因受歐亞陸塊的加熱而呈現上下層相反的壓力季節變化，4 公里高的玉山頂正好伸入反相位的上層大氣中。
- (2) 氣壓年循環變化分量在平地的振幅遠大於高山(約 3~4 倍)；這是由於重力位高度變化的幅度在低層與高層最大，但在中層(相位轉變處)最小的緣故。也因如此，玉山氣壓的年循環變化比嘉義微弱許多，繼而透露出清楚的半年週期分量。
- (3) 半年週期的壓力變化在玉山與平地都是一致的，而重力位高度的半年變化量結構向上延伸至 200hPa，最大幅度出現在中層大氣(約 600hPa)；因此，氣壓在玉山的半年週期變化幅度比嘉義來的大，與年循環的情形相反。
- (4) 東亞與西太平洋的季內變化受到二個主要的季風模支配：30-60 天及 12-24 天模。二者的垂直結構均勻地向上發展至 300hPa 高度，因此玉山與平地的氣壓季內振盪呈現一致的相位與振幅。
- (5) 日變化具有全日潮及半日潮二大分量；全日潮在平地的變化幅度大於玉山頂，而在夏季時，上下的變化相位幾乎相反。山下的氣壓最低值出現在下午 3-4 點，同時間玉山頂的全日潮則接近最高值。由於近地表大氣反應

日照的時間比起上層還快，使得夏季時低層大氣在日變化的時序上，領先中高層大氣將近 12 小時。

- (6) 無論在台灣何處，半日潮的幅度均大於全日潮，因為在熱帶大氣中，半日潮主宰了 24 小時的主要氣壓趨勢。半日潮的相位變化在山上與山下幾乎一致，而振幅則是平地大山頂小。

除了氣壓的分析之外，Chen 等人(1998)亦運用設於中央大學的剖風儀之長期資料，探討半日潮對台灣上空風場的影響。在比較過去其他科學家於北美洲的研究後，Chen 等人(1998)發現台灣上空的風場同樣反應著很強的半日潮訊號，尤其是介於 2000 到 6000 公尺的大氣層最為明顯，因而推論半日潮較不受地理位置與氣候的影響；無論風場或地面氣壓，台灣與北美洲都具有相似的半日潮結構，證實半日潮在北半球各地一致的結構。

玉山的氣象觀測不但能協助氣候研究，在當前氣象預報高度仰賴電腦模擬之際，看似細微的氣壓變化得以主宰模擬輸出值的正確與否，因此高山氣象資料的運用亦提供數值預報學界一個理想途徑來驗證電腦模擬表現。本文所回顧的這些研究發現不但曾向國際學術界推廣這座設於玉山頂的優質氣象站，也欲與國內氣象界分享台灣豐富的天氣現象。這些成果顯示，台灣的氣象資料與研究運用深達國際水準，亦希望能興起學術界對於台灣與週邊氣象的探索熱潮。

誌 謝

本文於第一作者訪問國立中央大學期間完

稿。其籌劃及執行由 NSC 95-2811-M-008-009、NSC95-2111-M-008-007、NSC94-2111-M-008-007 及國立中央大學「教育部發展國際一流大學計畫」等研究計畫支助。特別感謝鍾愛如小姐協助資料收集、編譯與校稿。此外，作者亦感謝二位審查委員對本文所提出的建議與指教。

參考文獻

- 謝新添與郭麗娟, 2004: *高度3858*。玉山社出版, 2004年10月01日, 159頁。
- Chapman, S. and R. S. Lindzen, 1970: *Atmospheric Tides: Thermal and Gravitational*. D. Reidel, 200pp.
- Chen, T.-C., 2003: Maintenance of summer monsoon circulations: A planetary-scale perspective. *J. Climate*, 16, 2022–2037.
- _____, and J.-M. Chen, 1995: An observational study of the South China Sea monsoon during the 1979 summer: Onset and life cycle. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2295–2318.
- _____, and M.-C. Yen, 1999: Annual variation of surface pressure on a high East Asian mountain and its surrounding low areas. *J. Climate*, 12, 2711–2716.
- _____, _____, and H. van Loon, 1996: An observational study of the tropical-subtropical semiannual oscillation. *J. Climate*, 9, 1993–2002.
- _____, _____, and R. Arritt, 1998: Detection of semidiurnal wind oscillations with a radar profiler. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 1921–1924.
- _____, _____, and J.-D. Tsay, 2000a: Annual and semiannual variations of surface pressure in Taiwan. *J. Climate*, 13, 1436–1440.
- _____, _____, and S.-P. Weng, 2000b: Interaction between the summer monsoons in East Asia and the South China Sea: Intraseasonal monsoon modes. *J. Atmos. Sci.*, 57, 1373–1392.
- _____, _____, and S. Schubert, 2001: Diurnal variation of pressure-heights: A vertical phase shift. *J. Climate*, 14, 3793–3797.
- _____, S.-Y. Wang, W.-R. Huang, and M.-C. Yen, 2004: Variation of the East Asian summer monsoon rainfall. *J. Climate*, 17, 744–762.
- Dai, A. and J. Wang, 1999: Diurnal and semidiurnal tides in global surface pressure fields. *J. Atmos. Sci.*, 56, 3874–3891.
- Haurwitz, B. and D. Cowley, 1973: The diurnal and semidiurnal barometric oscillations, global distribution and annual variation. *Pure Appl. Geophys.*, 102, 192–222.
- Holton, J., 2004: *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 4th Ed., International Geophysics Series, Vol 88, Academic Press, 535 pp.
- Judson, A., 1965: The weather and climate of a high mountain pass in the Colorado Rockies. *U.S. Forest Service research paper*. 28pp.
- Krishnamurti, T. N. and D. Subrahmanyam, 1982: The 30-50 day mode at 850mb during MONEX. *J. Atmos. Sci.*, 39, 2088–2095.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.-C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne and D. Joseph. 1996: The NCEP/NCAR 40-year

- reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Lau, K.-M., G. J. Yang, and S. H. Shen, 1988: Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 18-37.
- Lewis, J. M., 2003: Ooishi's Observation: Viewed in the context of jet stream discovery. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 357-369.
- Riehl, H., 1979: *Climate and Weather in the Tropics*. Academic Press, 611pp.
- _____, and B. Haurwitz, 1982: Diurnal variation of pressure-heights in Eastern Atlantic (GATE). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 74, 2331-2342.
- Saha, L., H. M. van den Dool, and S. Saha, 1994: On the annual cycle in surface pressure on the Tibetan Plateau compared to its surroundings. *J. Climate*, 7, 2014-2019.
- van den Dool, H. M. and S. Saha, 1993: Seasonal redistribution and conservation of atmospheric mass in a general circulation model. *J. Climate*, 6, 22-30.
- van Loon, H. and R. L. Jenne, 1969: The half-yearly oscillations in the tropics of the Southern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 26, 218-232.
- White, G. H., 1982: An observational study of the Northern Hemisphere extratropical summertime general circulation. *J. Atmos. Sci.*, 39, 24-40.
- Whiteman, C. D. 2000. *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press, New York, 355 pp.
- _____, and X. Bian, 1996: Solar semidiurnal tides in the troposphere: Detection by radar profilers. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 529-542.
- Wikle, C. K., and T.-C. Chen, 1996: On the semiannual variation in the Northern Hemisphere extratropical height field. *J. Climate*, 9, 2250-2258.

Variations of Atmospheric Pressure Viewed from the Yu-Shan Meteorological Station

Tsing-Chang Chen¹ Ming-Cheng Yen² Shih-Yu Wang¹

¹Department of Geological and Atmospheric Sciences,
Iowa State University, Ames, Iowa, U.S.A

²Department of Atmospheric Sciences, Chung-Li, Taiwan

(Manuscript received 30 September 2005; in final form 8 September 2006)

ABSTRACT

The Yu-Shan meteorological station was established in 1943. Because this station is located at an elevation close to four kilometers above sea level, long-term observations of surface meteorological variables at high-altitude are available. Surface pressure observed at this station is characterized by variations with several basic temporal scales, including annual, semiannual, intraseasonal, diurnal, and semidiurnal. In comprising annual variations of surface pressure around the Tibetan Plateau and the surrounding low plains, an out-of-phase relationship between high and low elevations was observed by previous studies. Attracted by this unexplained phase relationship of surface pressure and the unique geographic environment of the Yu-Shan station, a joint science team was formed by Iowa State University and National Central University to perform comprehensive analyses of station surface pressure in Taiwan. A series of papers was published to present their findings in surface pressure variations with different time scales. In order to make the meteorological community in Taiwan acquainted with these findings, a concise and systematic review of their work in this topic is presented in this paper.

The elevation of the Yu-Shan station reaches the mid-troposphere. The lower troposphere responds to the surface heating/cooling faster than the upper troposphere. This surface pressure at Yu-Shan exhibits an annual variation out-of-phase with the low plains. Similar phase disparity can be found in the diurnal variation of surface pressure: the low plains lead Yu-Shan almost 12 hours. Semidiurnal variation of surface pressure exhibits a coherent phase between Yu-Shan and low plains, except the former amplitude is only half of the latter. Intraseasonal (30-60 day and 12-24 day) variations of surface pressure appear to be vertically uniform in phase and amplitude up to 300 hPa, higher than Yu-Shan. Differences in phase and amplitude of surface pressure between the high and low altitude not only reflect the complicated structure of the atmosphere, but also provide an excellent means to validate simulations of regional/global climate models.

Key words: Surface Pressure, Temporal variation of Surface Pressure, Yu-Shan.

