

[研究成果報導]

福衛一號(華衛一號)對中、低緯度電離層研究的貢獻

中央大學太空科學研究所 蘇信一

一、前言

中華衛星一號(2004年改名為福爾摩沙一號)是我國第一顆人造衛星。1999年1月26日下午7時34分在美國卡那維爾角發射昇空。福衛一號的軌道是600公里的圓軌道，軌道傾角 35° 。福衛一號是近20年來繼1981年美國 Atmosphere Explorer E 及 1982年日本 Hinotori 完成任務後，再度探測中、低緯度的人造衛星。又剛好發射在太陽第23週期中太陽黑子活動週期的最高峰期(2000-2001)。加上福衛一號的電離層電漿電動儀 (Ionospheric Plasma and Electro-dynamics Instruments, IPEI) 的資料攝取是 100% duty cycle 以及具有 1024 Hz 超高解析度的能力，因之以福衛一號 IPEI 酬載儀觀測而發表在 SCI 期刊的論文共有 32 篇之多，其中 16 篇是由國內學者以第一作者執筆發表的，其他 16 篇則是國際合作的成果。

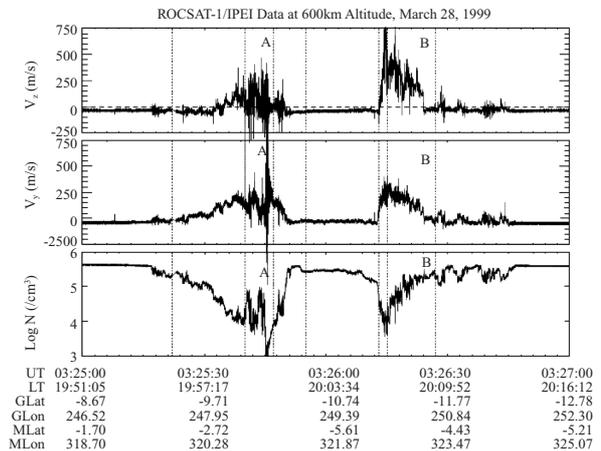
國內學者以 IPEI 資料研究的成果，可分為四大類：

1. 以 1024Hz 高解析度資料研究電離層電漿氣泡不規體的結構特徵。
2. 電離層電漿氣泡不規體發生機率的全球分佈特徵。
3. 磁暴時期，中、低緯度電離層的特殊現象。
4. 中、低緯度的電離層模式。

我們就以上四大研究課題的新發現，作下列的簡介。

二、電離層電漿氣泡不規體的結構體特徵

IPEI 酬載儀所量測每秒 1024 筆的離子密度以及垂直磁場的離子流速資料，是近年來以人造衛星量測到的最高解析度的資料，可供我們對電離層電漿氣泡不規體結構中的 transitional 尺度(1 至 100 公尺)作深入研究。我們發現在上昇成長的電漿氣泡以及成熟的電漿氣泡中，密度及速度



圖一 電離層電漿氣泡不規體的 1024 Hz 高解析度資料。 $(-V_z)$ 是氣泡上昇速度， V_y 則為東向流速， $\log N$ 為離子密度的對數值。兩個相鄰氣泡顯示完全不同的結果。西邊的是已成熟的氣泡，而東邊的則為正在成長的氣泡。摘自[1]

的波譜有相關性的變化[1]。如圖一所示，兩個相鄰的電漿氣泡，顯示完全不同的信息。右邊的氣泡是正在成長的氣泡，這可由上昇流速得知。而圖左的氣泡，因為上昇及下降流速混合在一起，平均速度為零，表示此氣泡已成熟。此時我們也發現密度及流速在 transitional 尺度的波譜斜率有相關性。在上昇成長的氣泡中，密度及流速的波譜斜率，隨時間的變化是一致的。而在成熟的氣泡中，密度及流速的波譜斜率變化則不一致。這表示成熟的氣泡，密度及流速在 transitional 尺度的消散，各有不同的時間尺度。

我們也以最近開始被廣泛應用的 Hilbert-Huang Transform (HHT) 來分析密度及上昇流速的關係[2]，發現氣泡中密度梯度的變化與上昇速度在大于 transitional 尺度(300 公尺以內)，流速的頻譜與密度的梯度變化，保持一定的關係 (Boltzmann relation)，表示 transitional 尺度中的流速是由電漿氣泡不規體的電場波動所產生的。

三、電離層產生 intermediate 尺度電漿氣泡不規體的全球分佈機率

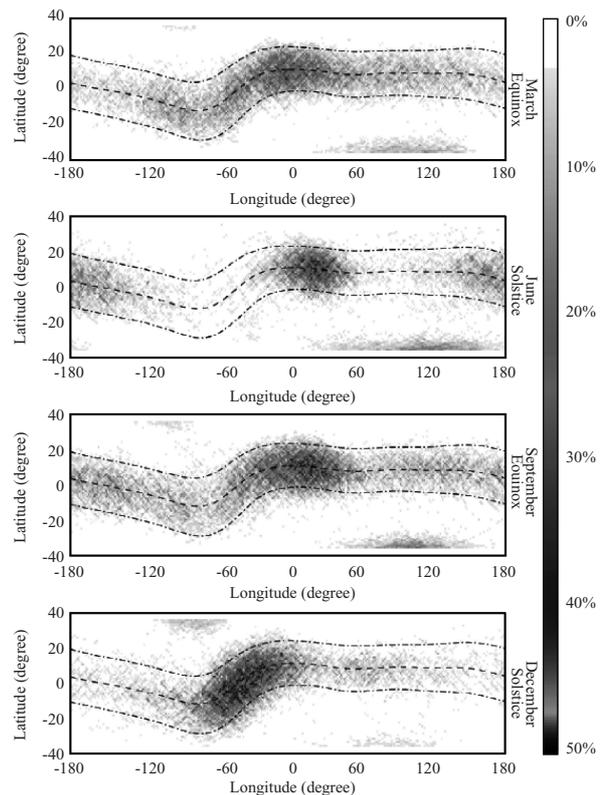
我們以 intermediate 尺度的電離層電漿氣泡不規體的產生，來代表所有不同尺度的密度不規體。則電離層所有密度不規體的產生可用下式

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\log n_i - \log n_{0i})^2}{10}}}{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (\log n_{0i})} \geq 0.3\% \quad (1)$$

來表示之。其中 n_i 是密度， n_{0i} 是線性回歸在 i 點的密度值。式(1)可以用計算機來自動快速計算 5 年半中，福衛一號量測到不規體的全球分佈機率。圖二就是全球分佈的機率圖。這張圖所顯示的意義相當重大。第一、這是繼美國 AE-E 人造衛星在 1979 年量測全球電離層不規體分佈圖之後，在太陽黑子再度進入高峰期(2000-2001)的新結果。第二、福衛一號所得的分佈圖比 AE-E 所得的分佈圖來得精密，解析度也高，並顯示出前所未有的緯度分佈。(AE-E 資料只有經度分佈)。此圖的重要性在於應用方面。因為電離層密度不規體的存在，是干擾太空通訊的主因。因此以圖二為基準，我們可以瞭解全球太空通訊產生高干擾的機率分佈圖。最嚴重的干擾地區是從南美東區跨過大西洋到西非洲。而且四季如一，並無太大的改變。雖然在太陽黑子減少時，干擾的機率會降低，但還是維持同樣的分佈圖。

我們也以 wave propagation 的 parabolic equation 公式為基準，用數值模擬解來模擬干擾通訊的現象。以平面波通過福衛一號所量測 1024Hz 的密度不規體的結果與地面所量測的電波閃爍(scintillation)資料相互比較，發現雖然模擬的閃爍值(S_4)比地面量測的大，但是隨時間的變化是一致的。

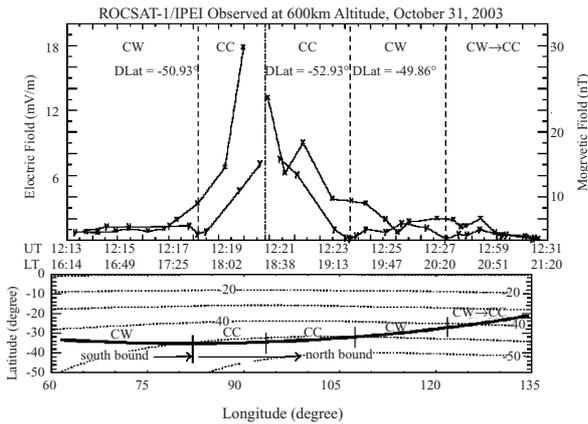
再者，圖二還隱藏著另一種意義。就是電離層不規體的緯度分佈，似乎都集中在南北磁緯 15 度以內。雖然以前也有零星的觀測，但圖二還是首次以統計結果明確地證明。同時也指出，高於南北緯度 20 度的不規體是屬於「非赤道地區」的不規體。它的產生機制與「赤道地區」的不規體完成不一樣。這個結論是前所未有的，我們正深入瞭解中。



圖二 福衛一號 5 年半(1999 年 3 月~2004 年 6 月)所觀測電離層不規體的四季分佈圖。大部份的不規體都分佈在經度西經 60 度至東經 40 度間，緯度則限於±15°磁緯間

四、磁暴時期的特殊現象

自 1999 年福衛一號昇空後，IPEI 酬載儀紀錄過很多有關在磁暴時，上層電離層所產生的特殊現象，這些都已撰文發表在期刊上[3-7]。我們只舉一例說明福衛一號的觀測結果[7]。這是第一次在太空中觀測到磁力線共振的現象(field-line resonance)。自 1968 年以來，磁力線共振的現象都是在地面以磁力計觀測的[8,9]。然而在地面上所觀測的磁力線共振會受到電離層電流流動的影響，無法真正觀測到磁力線共振的真相。雖然在太空中也有很多人造衛星觀測到磁力線的振動現象[10]，但迄今尚未觀測到磁力線的共振現象。福衛一號在 2003 年 10 月 31 日 Halloween 大磁暴時觀測到磁力線共振現象具有兩個特徵。第一是波動振幅在共振點(resonant point)最大，兩邊遞減。第二是共振兩邊的波動極化是反方向的。也就是說在共振點的一邊，波動是反時鐘極化的話，另一邊的極化則為順時鐘。圖三是



圖三 福衛一號觀測到磁力線共振現象。共振的特徵是 ΔE_x 電場波動振幅越靠近共振點越大，以及波動極化的在 $dE_y/dx=0$ 時從反時鐘方向(CC)變成順時鐘(CW)。[摘自 7]

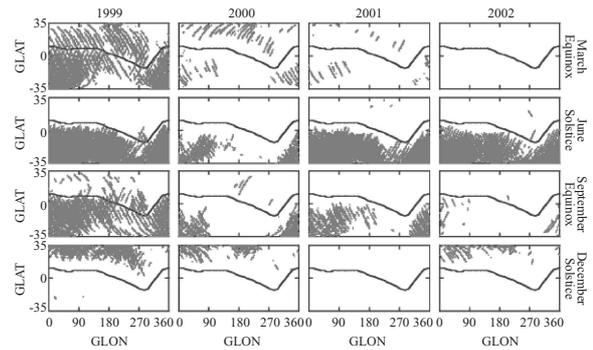
觀測的總結。圖三上圖是磁力線振動所導致電場波動的振幅變化與極化情形。我們看到波動電場的 ΔE_x 及 ΔE_y 隨福衛一號運行方向的變化，隨著靠近共振點而振幅變大。雖然福衛一號因為已到達軌道緯度最高點(35°)而轉返，並沒有通過共振點(可能位於>35°)。但在福衛一號轉返後， ΔE_x 及 ΔE_y 又漸變小。因為轉返到共振點的同一邊，所以波動的極化還是保持反時鐘方向(counter clockwise, CC)。但是經過 ΔE_y 的極小值

時($\frac{dE_y}{dx} = 0$)，極化現象變成順時鐘方向(CW)，這正是磁力線共振現象所應顯示的特徵。從圖三下圖可知 $\frac{dE_y}{dx} = 0$ 都發生在同一磁緯度(磁力線具有同長度)。在此磁力線的內、外，波動極化是相反的。

五、中、低緯度的電離層模式

以 5 年半 IPEI 的資料為基準，我們統計出各種不同描述電離層離子特性的模式。共有(1)離子密度模式，(2)離子成分模式，(3)離子垂直流速模式，以及(4)離子溫度模式。我們正努力與國際電離層基準模式(International Reference Ionosphere, IRI)的工作小組成員溝通，希望我們福衛一號的離子模式能被納入 IRI 模式中，來改進 IRI 模式的功能。

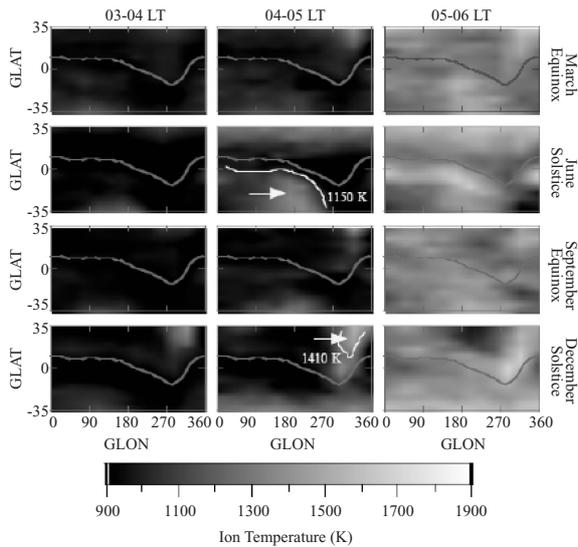
在 IPEI 模式中，不只是具有最新的統計結果，能改進先前電離層模式 IRI 的誤差，還具有



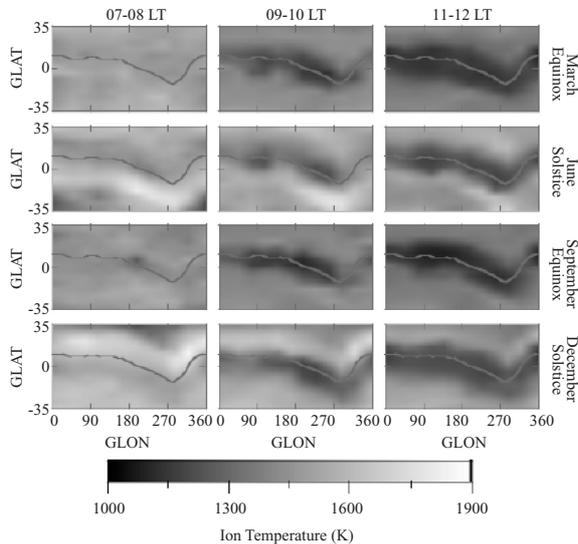
圖四 電離層在 600 公里高，氫離子變成主要離子成分的四季分佈圖。摘自[11]

新的發現，值得撰文發表在 SCI 期刊上[11-13]。就以離子成分模式為例，圖四顯示電離層在 600 公里由主要離子成分的氧離子變成由氫離子為主要成分的全球季節分佈圖。電離層的上層原先的主要成分是氧離子，再往上走時較輕的氧離子及氫離子才會漸漸代替氧離子，變成主要成分。這個高度稱為 transition height (轉換高度)。這個轉換高度通常在福衛一號的軌道之上，尤其在太陽黑子的高峰期，因為氧離子的增多，轉換高度更是提高至 1000 公里外。然而圖四指出，轉換高度在中、低緯度會因緯向的中性風(meridional wind)把氧離子吹著沿磁力線而推壓下來，導致氫離子在 600 公里會變成電離層的主要成分。因為中性風隨季節及太陽黑子會有變化，所以電離層的主要成分氫離子的年度及季節也隨之改變如圖四所示。其中春季因無南北吹向的中性風，所以氫離子在南北半球是對稱分佈。然而在夏、冬兩季，因為緯向中性風是由夏半球吹向冬半球，所以主要成分的氫離子呈現在冬半球。秋季則因中性風的轉向較慢，所以氫離子分佈還是追隨夏季的變化。但因風速漸漸反向，所以分佈比夏季少。氫離子也有機會在 600 公里高度，變成電離層主要的離子成分，只是這種情形比圖四來的少。

最後，我們簡單介紹電離層氧離子的日夜溫度變化。圖五是全球電離層溫度在日出後的四季變化圖。時間的順序由左至右，春、夏、秋、冬的變化則由上而下列成四列。圖五的最左行圖為凌晨 3 至 4 時。在微曦前，離子溫度與中性氣體還是維持等溫平衡。在 4 至 5 時，微曦時，離子在夏、冬兩季的冬半球開始先增溫。雖然陽光在夏、冬兩季最先照射在夏半球，但



圖五之一



圖五之二

圖五 電離層離子溫度隨時間變化的增溫圖。摘自[12,13]

是離子溫度的最先增溫是發生在冬半球。原因是在夏半球最先游離化的高能電子會沿著磁力線跑到冬半球，再與中性粒子碰撞而游離化在冬半球的一對電子及氧離子，氧離子再與電子相互作用而平衡溫度。所以在夏、冬兩季，冬半球的氧離子及電子先增溫。在春、秋兩季這種情形反而不易發生。其後離子溫度隨時間增加而急速增溫，這是因為受日光游離化的高能電子，把它的能量分散給少量的低能電子。在凌晨時，電子的密度還停留在晚上的密度較低的範圍，所以每顆電子能分到較多的能量，電子的溫度就急速暴增。電子又與氧離子碰撞，把能量分給離子，所

以離子也跟著急速增溫。這種增溫現象一直維持到 7-8 點鐘時，到達最高溫。其後，因為游離化的低溫電子(及離子)的密度慢慢增多，所以溫度開始被均分掉而漸漸下降。再者，因為在磁赤道的電子(離子)密度最大，所以磁赤道的溫度較中、低緯度來的低。

這些福衛一號的離子成分模式以及離子溫度模式都是 IRI 模式所缺少的。所以我們正極力爭取 IRI working group 能把我們福衛一號所量測而統計出的離子模式包含在 IRI 模式中。因為 IRI 模式常被國際研究電離層的學者廣泛引用，所以當福衛一號的電離層離子模式能被納入 IRI 模式，則福衛一號在電離層的研究貢獻，將更上一層樓。

參考文獻

- [1] S.-Y. Su, H. C. Yeh and R. A. Heelis, *J. Geophys. Res.*, **106**, 29153 (2001).
- [2] K. Y. Chen, H. C. Yeh, S.-Y. Su, C. H. Liu and N. E. Huang, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3107 (2001).
- [3] H. C. Yeh, S.-Y. Su and R. A. Heelis, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 685 (2000).
- [4] S.-Y. Su, H. C. Yeh, C. K. Chao and R. A. Heelis, *J. Geophys. Res.*, **107**, 1404 (2002).
- [5] S.-Y. Su, C. K. Chao, H. C. Yeh and R. A. Heelis, *J. Geophys. Res.*, **108**, 1310 (2003).
- [6] S. -Y. Su, H. C. Yeh, C. K. Chao and R. A. Heelis, *J. Geophys. Res.*, **109**, A06307 (2004).
- [7] S.-Y. Su, K. Y. Chen, J. M. Wu, H. C. Yeh and C. K. Chao, *J. Geophys. Res.*, **110**, A01303 (2005).
- [8] J. C. Samson, *Geomagnetism*, **4**, 481 (1991).
- [9] L. J. Lanzerotti, N. Fukunishi and L. Chen, *J. Geophys. Res.*, **79**, 4648 (1974).
- [10] N. Lin et al., *J. Geophys. Res.*, **97**, 14859 (1992).
- [11] S.-Y. Su, C. K. Chao, H. C. Yeh and R. A. Heelis, *J. Geophys. Res.*, **110**, A01302 (2005).
- [12] C. K. Chao, S.-Y. Su and H. C. Yeh, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1187 (2003).
- [13] C. K. Chao, S.-Y. Su and H. C. Yeh, *J. Geophys. Res.*, **109**, A11303 (2004).