

## 7.2 夜間上部電離圏における $O^+$ イオン密度 トラフの季節変化特性

宮崎 茂\* 巖本 巖\*\* 森 弘隆\*\*  
佐川 永一\*\* 水津 武\*\*\* 小川 忠彦\*\*\*

### CHARACTERISTICS OF SEASONAL VARIATIONS OF $O^+$ ION DENSITY TROUGHS IN THE NIGHTTIME TOPSIDE IONOSPHERE

By

Shigeru MIYAZAKI, Iwao IWAMOTO, Hiroataka MORI,  
Eiichi SAGAWA, Takeshi SUITZ and Tadahiko OGAWA

Proton, helium ion and oxygen ion densities at about 1100 km in the topside ionosphere were observed by the Bennett type ion mass spectrometer on ISS-b during the maximum solar activity period from August 1978 to November 1979. Their global characteristics for seasonal and local time variations were studied by using the spherical surface harmonic expansion method.

The results show that there exist distinguished  $O^+$  ion density trough regions, and that the centers of main trough are located around the longitudes  $0^\circ E$  and  $180^\circ E$  respectively in northern summer and in northern winter, and around the latitudes  $35^\circ \sim 70^\circ$  in the winter hemisphere. The main trough region changes its location with respect to the seasons by almost  $180^\circ$  in longitude and by moving toward the opposite hemisphere in winter, during rather short term around equinox conditions. The regions of relatively high and low  $O^+$  ion density show good correlation with the regions of the eastward and westward declination of the earth's magnetic field in connection with the seasons.

A theoretical interpretation is examined such that the  $O^+$  ion density trough is enhanced by the field-aligned plasma flow induced from neutral air wind pattern coupled with the earth's magnetic field. The seasonal variation of  $O^+$  ion density can be explained by the changes in the direction of the vertical plasma flow depending on the seasonal changes in the neutral air wind system.

#### 1. 緒 言

熱圏の大気温度は明らかな日変化を示す。すなわち、太陽天頂角によって大気温度が変化する。世界的な温度分布の不均一は大気圧のこう配を生じ、上層大気の運動を引き起こす。その際、粒子間の衝突によって中性大気から電離大気へ運動量の輸送が行われる。運動量の輸送は質量比に依存するので、電子よりもイオンに対して重要な影響を及ぼす。この種の力は air drag と呼ばれる。

この中性大気による air drag は F 領域及び上部電離

圏領域のプラズマ状態に著しい影響を与える。更に荷電粒子の運動は磁場によって拘束される。したがって、F 領域及び上部電離圏領域の荷電粒子密度の高度分布及び緯度、経度分布は太陽活動度、季節、時刻等による変化も含めて複雑に変化する。

中性大気風と地球磁場に関する現象として、Eyfrig (1963) による F2 層の磁場偏角の効果に関する研究がある。すなわち、 $f_oF2$  の日変化におけるピークの現れる時刻が地磁気の偏角に依存することを見いだした。Kohl and King (1967) は Jacchia の大気モデルから中性大気の風系を計算し、それと地磁気偏角の効果を考察して  $f_oF2$  の midday bite-out、夜間 F 層の維持等の現象を説明した。Papagiannis and Mullaney (1971)

\*平磯支所 \*\*衛星計測部 第二衛星計測研究室

\*\*\*平磯支所 超高層研究室

は  $f_oF2$  の evening anomaly と中性大気風の global pattern との関係調べた。Challinor and Eccles (1971) 及び Eccles *et al.* (1971) は中性大気風によって生ずる中緯度電離圏の経度変化について考察している。また、他の関連現象について Hanson *et al.* (1973), Rishbeth *et al.* (1977), Heelis *et al.* (1978) などの研究者によって赤道域の夜間上部電離圏の電子及びイオン温度トラフ (trough) の観測及び理論的考察が行われ、これは中性大気風による赤道横断プラズマ流に起因することが明らかにされた。更に Mayr *et al.* (1972) は interhemispheric plasma flow によって  $O^+-H^+$  イオン遷移高度が変わること、Kutiev *et al.* (1980) は  $O^+-H^+$  イオン遷移高度の観測とそれに対する zonal and meridional wind の役割を調べた。

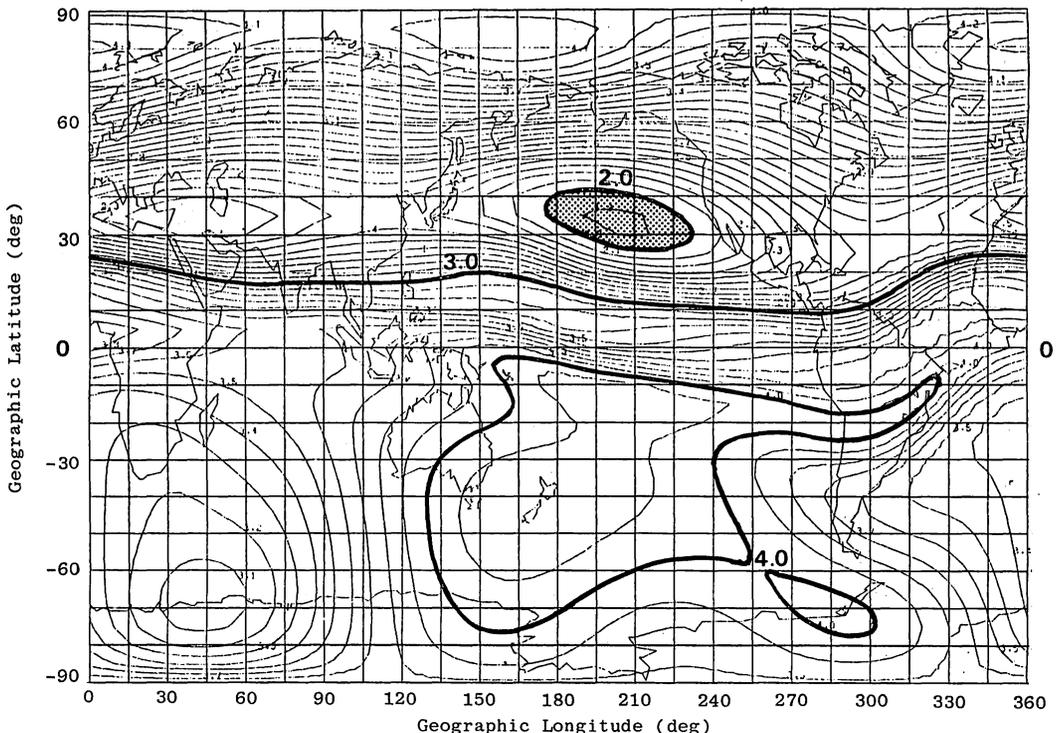
以上のようにF領域、上部電離圏領域のプラズマの構造の特徴を地磁気と中性大気風による影響の結果として説明する理論及び観測結果が、今までに多くの研究者によって種々出されている。ここでは電離圏観測衛星 (ISS-b) によって、 $O^+$  イオン密度の世界分布において顕著なトラフ領域 (trough region) が存在することが観測されたので、その結果と理論的考察について述べる。

## 2. 観測結果

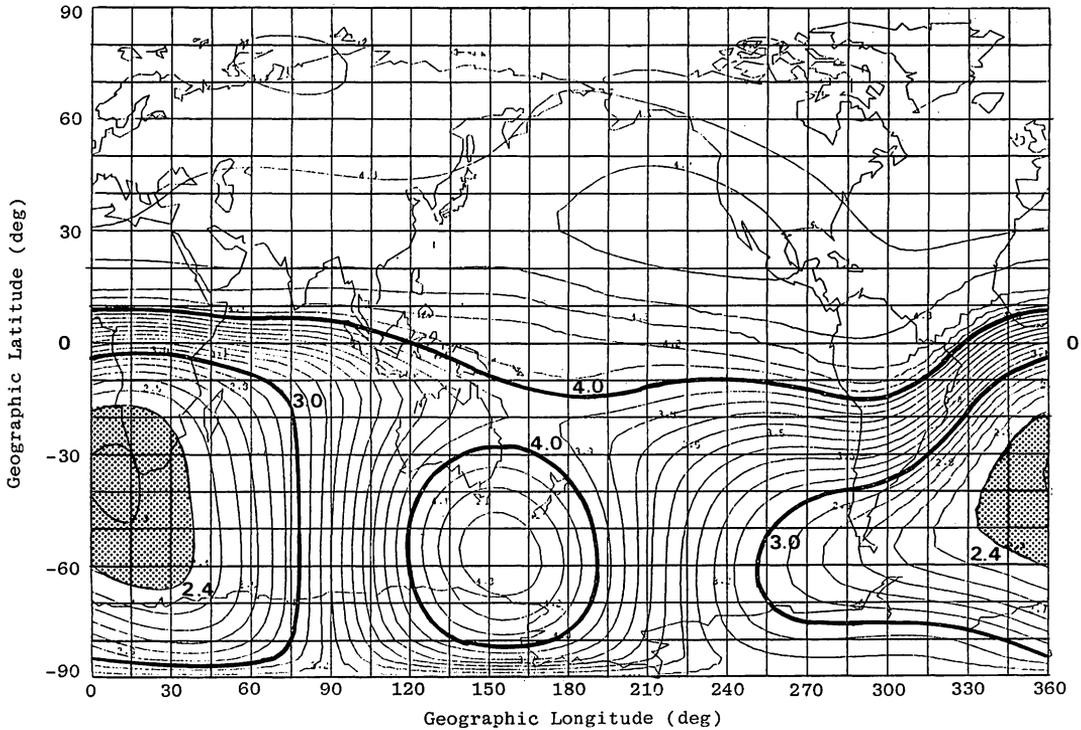
電離圏観測衛星は  $70^\circ N \sim 70^\circ S$ 、全経度を時間、空間的に均一に上部電離圏を汎世界的に観測できる。このために従来衛星の個々の軌道に沿った観測の結果から得られている現象に対して、統計的、平均的に現象を解釈し、解析できる。電離圏観測衛星の諸元、運用等については文献 (Wakai and Matuura, 1980) に詳しく述べてある。またイオン質量分析器の諸元、データ解析については文献 (Iwamoto *et al.*, 1977; 巖本ほか, 1981) を参照されたい。

第1~4図は  $O^+$  イオン密度の世界分布図である。第1図は1979年2月5日から3月19日の間の春分時前の43日間、第2図は1979年4月4日から5月28日の春分時後の55日間における地方時23~01時のデータに基づいている。これらの図の特徴について述べる。

第1図については、南半球では  $200^\circ E$  付近を中心とした領域において  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  オーダの密度であり、 $45^\circ E$  付近では  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  オーダであるが全体としては、密度はほぼ一様と考えられる。これに対して北半球では密度の変化がかなり大きい。 $35^\circ N$ 、 $200^\circ E$  付近を中心とした領域が  $10^2 \text{ cm}^{-3}$  以下の値を示している。また、 $35^\circ N$ 、 $45^\circ E$  を中心とした領域も  $10^2 \text{ cm}^{-3}$  オーダの密度を示し



第1図  $O^+$  イオン密度分布。1979年2月5日~1979年3月19日、地方時0±1時、 $K_p \leq 4$ 。



第2図 O<sup>+</sup>イオン密度分布。1979年4月4日~1979年5月28日，地方時0±1時，K<sub>p</sub>≤4+。

て，第2の O<sup>+</sup>イオンのトラフ領域の存在を示している。200°E 付近の密度の緯度に関するこう配はかなり大きい，45°E 付近のこう配はそれに対して小さい。

第2図は北半球では密度分布はほぼ 30°N, 225°E 付近を中心とした領域がわずかに密度が低くなっているが，北半球全体としてはほぼ一様であり，密度は 10<sup>4</sup> cm<sup>-3</sup> のオーダーである。これに対して南半球は密度の変化が大きい。約 40°S, 10°E を中心とした密度のかなり低い領域が存在し，その値は 10<sup>2</sup> cm<sup>-3</sup> のオーダーである。また，約 60°S, 150°E 付近は密度が高くなっている。0°E 近辺の密度の緯度に関するこう配は大きく，逆に 180°E 近辺のこう配は小さい。

この両図から明らかになったことは，冬に近い半球に O<sup>+</sup>イオン密度のトラフ領域が存在し，その経度付近の緯度に関するこう配は大きく，それに対して 180° 異なる反対側の領域のこう配は小さい。そしてこれらの特徴は，春分時を境にして急に変化し移っていく。秋分時にはこれと逆の変化をすることが確かめられた。

第3図及び第4図は北半球の冬及び夏を中心とした約6か月間の平均的な O<sup>+</sup>イオンの世界分布を示す。これらの世界分布の特徴は第1図及び第2図と各々同じである。このことから夏季の状態から冬季の状態への変化は equinox を境にして割合いすみやかに起こることが分かる。すなわち，equinox の中間の状態が存在しない

かあるいは存在してもかなり短期間であることが推定される。

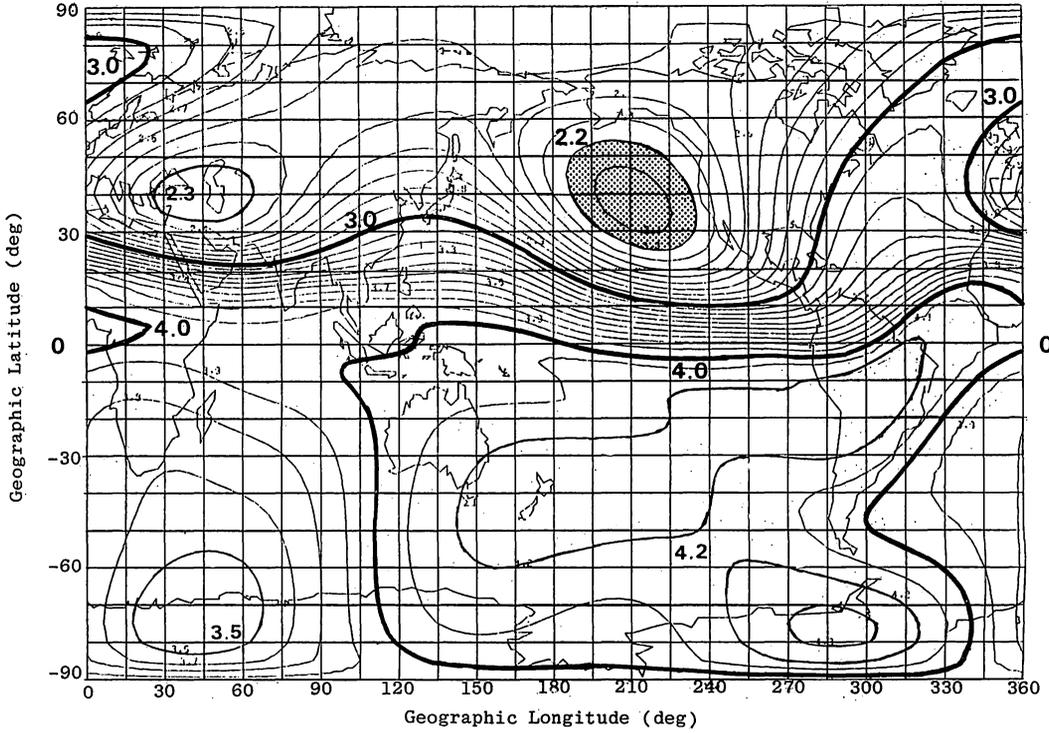
### 3. 考 察

イオン密度の世界分布の測定は少ないが，Kutiev *et al.* (1980) の OGO-6 による 1969年7月，2300~0030 地方時，1000~1100 km の O<sup>+</sup>イオン密度の 45°N~60°S までの世界分布図（論文の Fig. 5）がある。これと対応する第1図と比較すると密度の増減の領域及びそれらの特徴の対応関係が非常によいことが分かる。彼らは O<sup>+</sup>イオンのトラフ領域で O<sup>+</sup>-H<sup>+</sup>イオン遷移高度が著しく低いことを示し，この原因として，F 領域の中性大気風の効果を挙げている。また，緒言において述べたように f<sub>o</sub>F2 の日変化の特性，電子及びイオン温度トラフの特性等も，中性大気風の効果に起因することが論じられている。

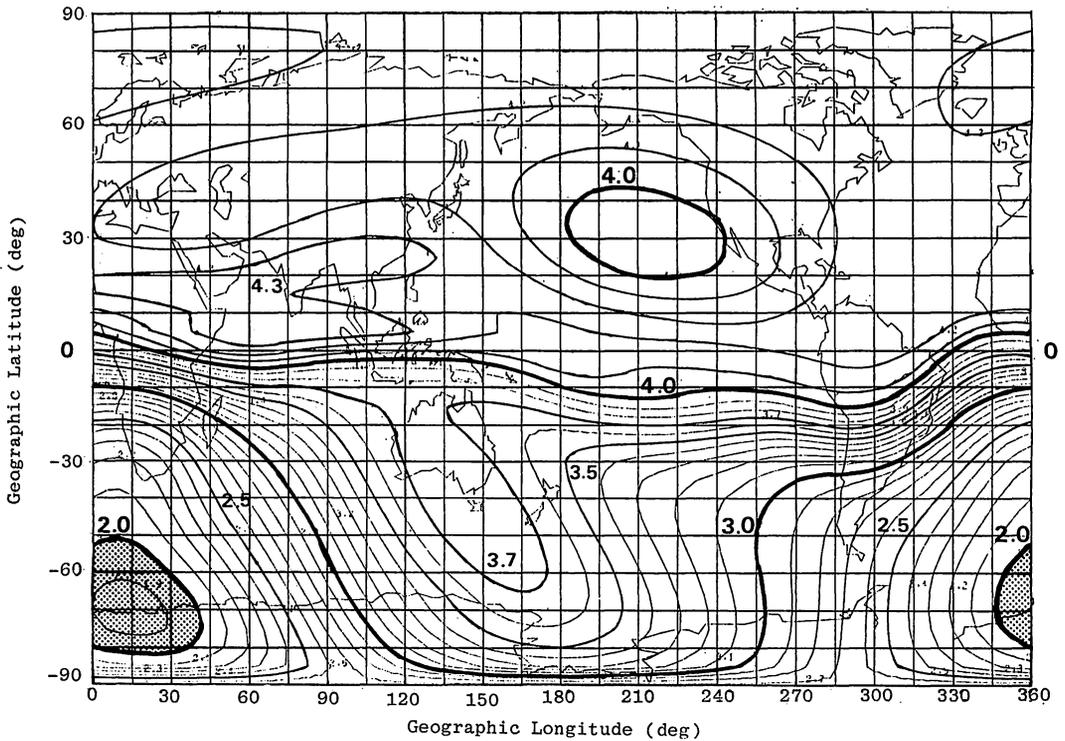
さて，イオン密度 N<sub>i</sub> を支配する連続の式は次のように表される。

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = Q_i - L_i - \text{div}(N_i \mathbf{v}_i), \quad \dots\dots(1)$$

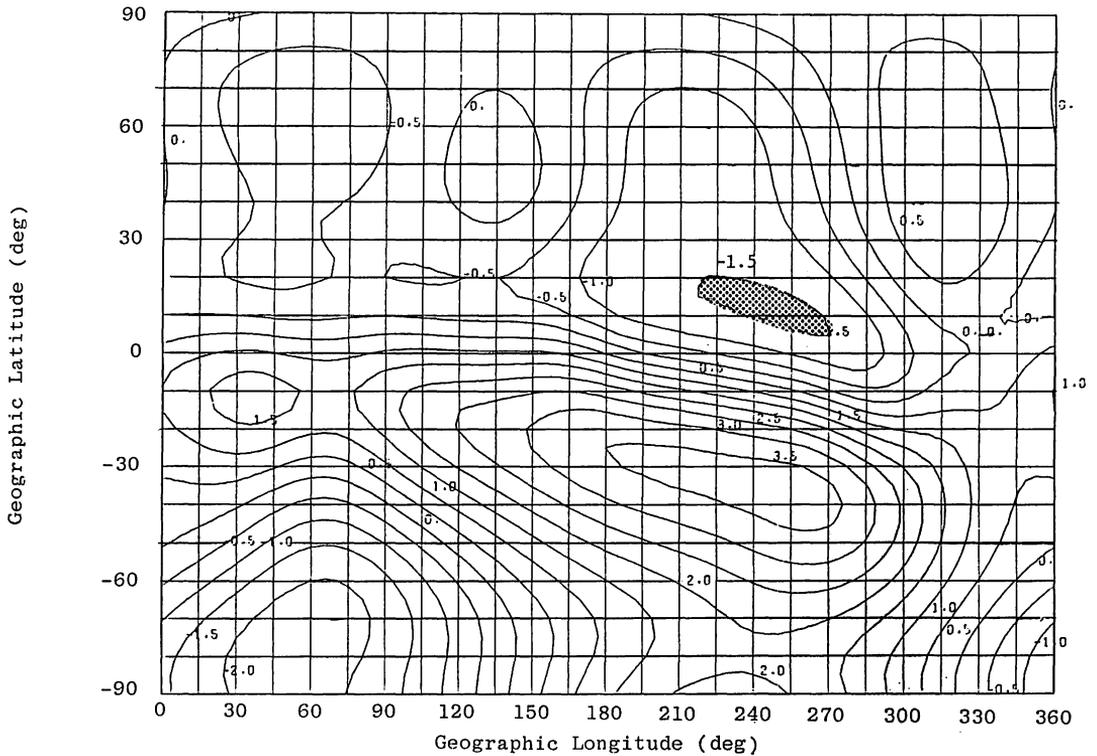
ここで  $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_{diff} + \mathbf{v}_{i-n} + \mathbf{v}_{E \times B}$  である。Q<sub>i</sub>, L<sub>i</sub> はイオンの生成率，消滅率であり， $\mathbf{v}_i$  はイオンの運動速度， $\mathbf{v}_{diff}$  は拡散速度， $\mathbf{v}_{i-n}$  はイオンと中性大気との衝突によって得る速度， $\mathbf{v}_{E \times B}$  は電場と磁場によるドリ



第3図 O<sup>+</sup>イオン密度分布。1978年10月5日~1979年3月19日, 地方時 23±1時,  $K_p \leq 4+$ 。



第4図 O<sup>+</sup>イオン密度分布。1979年4月4日~1979年9月16日, 地方時 23±1時,  $K_p \leq 4+$ 。



第5図 高度300 kmにおける荷電粒子の鉛直方向ドリフト成分の相対分布図。正及び負の符号はそれぞれ上昇流及び下降流を示す。北半球の冬至、地方時20時の場合。

フト速度を表す。ここでは主として中緯度付近において、イオン密度の高度に対する拡散平衡分布が、中性大気風の影響 ( $v_{i-n}$ ) の有無でどのように変化するかを考察する。荷電粒子と中性大気風との相互作用が最も強いのはF領域である (Bailey and Hellis, 1980)。荷電粒子の運動 ( $v_{i-n}$ ) は磁場に束縛され、磁力線に沿う運動を行う。したがって、荷電粒子の流れの速度は中性大気風の運動の磁力線方向の成分に比例する。さて、荷電粒子の上昇流は下領域より上部の密度を増加し、下降流は密度を減少させる。ここでは中性風のパターンとして Jacchia の大気モデルから Blum and Harris (1975) が計算によって求めた 300 km 高度における風系を用いる。また、地球磁場として IRGF 1975 を用いる。荷電粒子の鉛直方向の速度成分を  $v_z$  とすると、

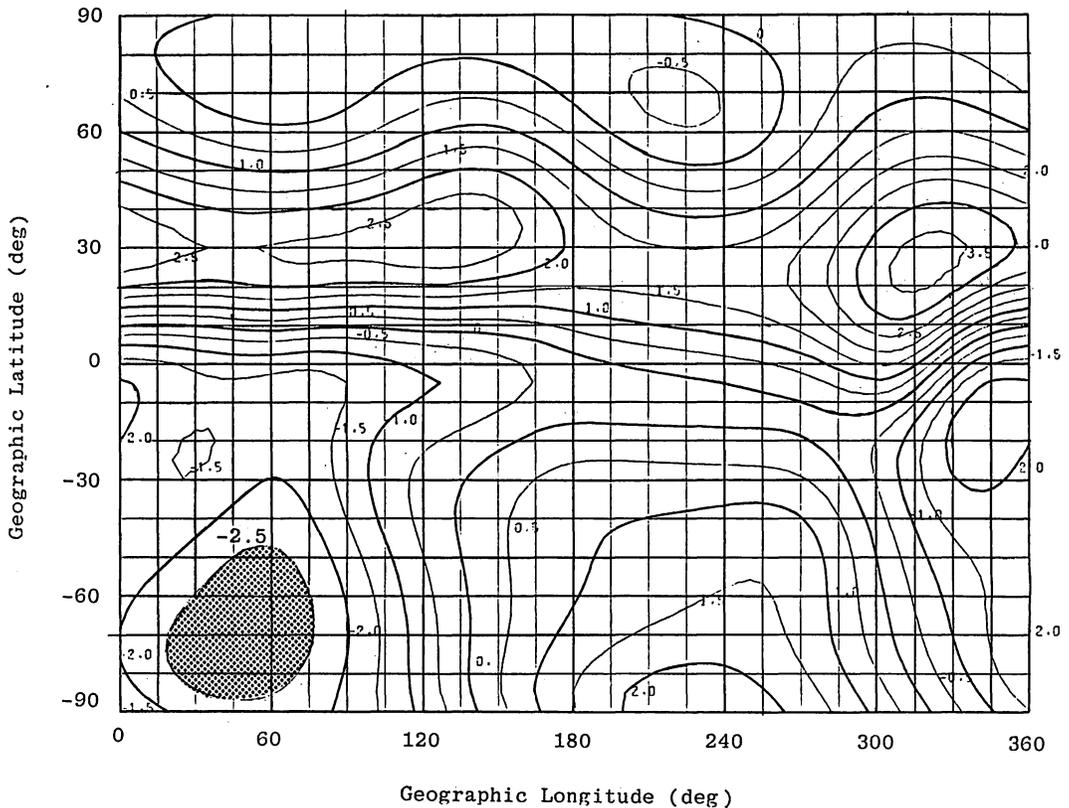
$$v_z \propto v_n \cos \omega \sin \omega \cos \phi \quad \dots\dots(2)$$

ここで  $v_n$  は中性風の速さ、 $\omega$  は磁場の伏角 (dip angle)、 $\phi$  は地磁気水平成分と中性風の向きとのなす角である。 $v_z$  の計算結果を次に示す。第5図及び第6図は北半球が冬至及び夏至のときの高度300 kmにおける中性風によって誘起された荷電粒子の運動速度の鉛直成分  $v_z$  の相対値を示す。地方時は20時である。正の符号は上昇流を示し、負の符号は下降流を示す。上昇流は上部

電離圏での  $O^+$  イオン密度の増加を、下降流は減少をもたらすものと考えられる。第5図から得られる結論は網目模様で示すごとく下降流の領域 (相対的に密度の低い領域) が現れ、その中心は約  $15^\circ N$ ,  $240^\circ E$  である。その反対半球側では上昇流 (密度は相対的に高い) となっている。したがって、その経度付近の緯度に関する上下流こう配は大きい、すなわち、密度こう配は大きくなっている。また、第5図の場合、経度  $45^\circ$  付近で両半球間における上下流こう配の大きい場所が存在し、下降流の中心は、ほぼ  $30^\circ N$ ,  $45^\circ E$  になることが推定される。約  $75^\circ S$ ,  $60^\circ E$  を中心にして下降流の顕著な領域が存在するが、両半球間の上下流のこう配は前者より小さい。かつ緯度が高いので、高緯度に関する複雑な状態を考慮する必要がある。

第6図については、網目模様で示すごとく、下降流の領域 (相対的に密度の低い領域) の中心は約  $70^\circ S$ ,  $45^\circ E$  であり、その反対半球側では上昇流 (密度は相対的に高い) となっている。したがって、その経度付近の緯度に関する上下流こう配 (密度こう配) は大きい。そしてそれと  $180^\circ$  経度の異なった場所では上下流こう配 (密度こう配) は小さい。

第1, 3図と第5図、そして第2, 4図と第6図をそ



第6図 北半球の夏至の場合の特性で、その他は第5図と同じ。

それぞれ比較すると定性的には細かい密度増減の特徴までよく合っていることが分かる。特に、北半球冬至における  $O^+$  イオン密度の二つのトラフ領域は磁場の偏角がともに東向き領域と完全に一致しているのは興味がある。Challinor and Eccles (1971) は  $f_oF2$  の特性を調べて、北半球において、その LT 変化は二つの極値をもつが、南半球では一つの極値であることを述べていることに関連して興味がある。

最後に昼間の特性について触れる。夜間に比べて昼間の場合には種々の因子がイオン密度分布に影響を与えるが、観測の結果は夜間の場合に比べて相対的にトラフの深さは小さくなる。そして経度が  $180^\circ$ 、緯度は反対半球に移る。これに対応する荷電粒子の鉛直成分の運動を計算すると比較的観測結果と合うことが分かった。

#### 4. ま と め

ISS-b のイオン質量分析器によって上部電離圏プラズマのイオン組成が観測され、その世界分布が求められた。特に、ISS-b の周回モードにより、時間的空間的に均一に観測できるので、上部電離圏の統計的、平均的特性を明らかにすることが出来る。次に、今回得られた観測結果及び考察についてのまとめを述べる。

(1)  $O^+$  イオン密度の夜間世界分布において顕著なトラフ領域が存在する。

(2) そのトラフ領域の中心は、北半球の冬季においては経度  $180^\circ$  付近、北半球の夏季においては経度  $0^\circ$  付近、緯度に関しては冬半球の  $35^\circ \sim 70^\circ$  付近に存在する。

(3) この特性は中性大気風と地球磁場の関係によって生ずる荷電粒子の下降流に起因することが定性的に理解される。

最後に今後の問題点について記す。

(a) 中性大気風の高度分布を考慮に入れたより詳しいモデルを使って解析する必要がある。

(b) 磁力線に沿っての反対半球と間の荷電粒子流の効果を考慮する必要がある。

(c)  $f_oF2$ ,  $h'F2$  等の他のパラメータとの関係を用いて総合的に解析する必要がある。

(d)  $O^+$  イオン密度分布を用いて、逆に前節で述べた関係から上部電離圏内の風系の様子を推定することができよう。

#### 謝 辞

本研究に対して有益なる議論及び査読されたことに関して松浦延夫前平磯支所長に深甚なる感謝の意を表しま

す。また、地磁気特性の計算プログラムの使用に関して電波部宇宙空間研究室の渡辺成昭主任研究官に感謝します。

### 参 考 文 献

- Bailey, G. J. and Heelis, R. A. ; "Ion temperature troughs induced by a meridional neutral air wind in the night-time equatorial topside ionosphere", *Planet. Space Sci.*, **28**, pp. 895—906, 1980.
- Blum, P. W. and Harris, I ; "Full non-linear treatment of the global thermospheric wind system-I. Mathematical method and analysis of forces", *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, pp. 193—212, 1975.
- Challinor, R. A. and Eccles, D. ; "Longitudinal variations of the mid-latitude ionosphere produced by neutral-air wind-I. Neutral-air winds and ionospheric drifts in the northern and southern hemispheres", *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, pp. 363—369, 1971.
- Eyfrig, R. W. ; "The effect of the magnetic declination on the F2 layer", *J. Geophys. Res.* **68**, pp. 2529—2530, 1963.
- Hanson, W. B., Nagy, A. F. and Moffett, R. J. ; "OGO 6 measurements of supercooled plasma in the equatorial exosphere", *J. Geophys. Res.*, **78**, pp. 751—756, 1973.
- Heelis, R. A., Bailey, G. J. and Hanson, W. B. ; "Ion temperature troughs and interhemispheric transport observed in the equatorial ionosphere", *J. Geophys. Res.*, **83**, pp. 3683—3689, 1978.
- Iwamoto, I., Fugono, N. and Sultz, T., Observations of the positive ion composition by ISS., *Proc. of 12th Int. Symp. on Space Technology and Science*, pp. 843—848, Tokyo, Japan, 1977.
- Kohl, H. and King, J. W. ; "Atmospheric winds between 100 and 700 km and their effects on the ionosphere", *J. Atmos. Terr. Phys.*, **29**, pp. 1045—1062, 1967.
- Kutiev, I., Heelis, R. A. and Sanatani, S. ; "The behavior of the O<sup>+</sup>—H<sup>+</sup> transition level at solar maximum", *J. Geophys. Res.*, **85**, pp. 2366—2372, 1980.
- Mayr, H. G., Fonthelm, E. G., Brace, L. H., Brinton, H. C. and Taylor, H. A., Jr. ; "A theoretical model of the ionosphere dynamics with inter-hemispheric coupling", *J. Atmos. Terr. Phys.*, **34**, pp. 1659—1680, 1972.
- Papagiannis, M. D. and Mullaney, H. ; "The geographic distribution of the ionospheric evening anomaly and its relation to the global pattern of neutral winds", *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, pp. 451—459, 1971.
- Rishbeth, H., VanZandt, T. E. and Hanson, W. B. ; "Ion temperature troughs in the equatorial topside ionosphere", *Planet. Space Sci.*, **25**, pp. 629—642, 1977.
- Wakai, N. and Matuura, N. ; "Operation and experimental results of the Ionosphere Sounding Satellite-b", *Acta Astronautica*, **7**, pp. 999—1020, 1980.
- 巖本巖, 佐川永一, 水津武 ; "電離層観測衛星 (ISS-b) によるイオン組成の観測", *電波研季報*, 本号.

