

# 電離層電子のエネルギー分布非等方性

渡部 重十・小山孝一郎・阿部 琢美\*

(1988年12月26日受理)

## Anisotropy of Electron Energy Distribution in the Topside F Region Ionosphere

By

Shigeto WATANABE, Koh-Ichiro OYAMA and Takumi ABE

**Abstract:** Numerical simulations of Boltzmann's equation have been carried out in order to investigate the anisotropy of the electron energy distribution in the topside F region ionosphere. The equation contains both electron-electron collisions and electron-ion collisions. The simulations were compared with the observational data obtained with the electron temperature probe on board the Ohzora satellite. The results show that the anisotropy of the electron energy distribution can be generated in the topside F region ionosphere and that the electron energy distribution can differ from the Maxwell distribution, when an electric field or temperature gradient (heat flux) exists in the plasma. The simulations also indicate the dependence of electron density on the anisotropy of the ionospheric electron energy distribution.

### 要 旨

おおぞら衛星に搭載された電子温度プローブを用いて、電子温度分布の非等方性がF層上部で観測された。電子温度の非等方性は磁力線方向で高い電子温度を一般に示し、高緯度域で主に観測される。

---

\* 電気通信大学

これらの観測結果はボルツマン方程式を用いた電子エネルギー分布のコンピュータ・シミュレーションと比較された。その結果、高緯度域では電子エネルギー分布の非等方性を生成する主な原因は磁力線に平行な電場によるジュール加熱或は磁気圏からの熱輸送であることが明かとなった。さらに、コンピュータ・シミュレーションは電子エネルギー分布が非等方性を示す時その分布はマクスウェル分布からはずれていることを示している。

## 1. 序 論

電離層電子のエネルギー分布非等方性は衛星、ロケットによる直接測定及びレーダーなどによる観測から明らかにされてきた (Oya and Benson, 1972; Wrenn et al., 1973; Clark et al., 1973; Dumbs and Neske, 1978; Likhter et al., 1979; Fester et al., 1984; レビューとして Oyama and Schlegel, 1988)。その結果はオーロラ領域で磁力線に平行な電子温度成分が大きくなっていることを示している。しかしこれらの観測結果は角度依存性についての詳細な報告はなされていないために広く受け入れられてはいない。おおぞら衛星に搭載された電子温度プローブは、電離層電子の温度非等方性を衛星のスピンの利用することにより詳細に測定した。電離層電子はクーロン散乱が強いために等方的なマクスウェル分布になっていると一般に考えられているが、おおぞら衛星による観測結果は磁力線に平行な成分の温度が 1.1~1.4 倍高く、これらの現象は高緯度域及び明け方で主に観測されることを示している。電子温度の非等方性を生成する原因として温度勾配による熱輸送、高エネルギー電子による加熱及び電場によるジュール加熱が考えられている (Krinberg and Klimov, 1970; Schunk and Watkins, 1981; Konikov and Khazanov, 1981; Konikov and Khazanov, 1983, 1984; Konikov et al., 1983; Gorbachev et al., 1984; Khazanov et al., 1984)。彼らは磁力線に平行な温度 ( $T_{\parallel}$ ) と垂直な温度 ( $T_{\perp}$ ) について二つのエネルギー方程式を解くことにより非等方性を議論している。しかし、おおぞら衛星による観測結果は電子のエネルギー分布はマクスウェル分布になっていないときがあることを示していた。我々はボルツマン方程式を数値的に解くことにより、電離層電子のエネルギー分布のシミュレーションを行った。さらに、そのシミュレーション結果は観測結果と比較された。

## 2. おおぞら衛星による電子温度の観測

おおぞら衛星に搭載された電子温度プローブを用いて電離層電子の温度の非等方性が観測された (Oyama et al., 1985; Oyama and Abe 1987)。その観測の 1 例を図 1 に示す。衛星はスピンをしながら高緯度で電子温度の観測を行った。ハッチした部分は電子温度プローブが進行方向から 90 度以上の角度にあったことを示している。この領域では電子温度プローブは衛星のウェイクの中にあり、電離層電子の温度を正しく測定してはいないと考えられる。ウェイク以外の領域で測定された電子温度は中央付近で電子温度が減少するという特徴的な構造を示している。

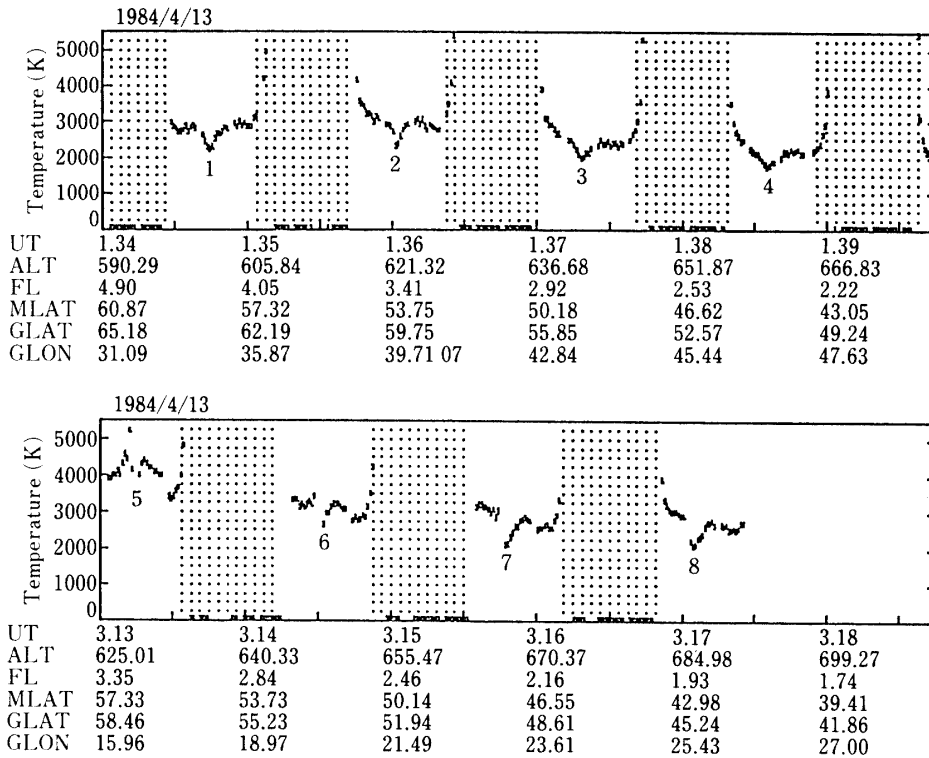


図 1 おおぞら衛星による電子温度の観測の 1 例。斜線部分は電子温度プローブが衛星の進行方向に対して 90 度以上の角度にあったときを示している。データの中央付近の減少は磁力線と電子温度プローブの表面とが平行になったときに現れている。UT, ALT, FL, MLAT, GLAT, GLON は世界時(時分), 高度(km), L-値, 磁気緯度(度), 地理緯度(度), 地理経度(度)をそれぞれ示している。

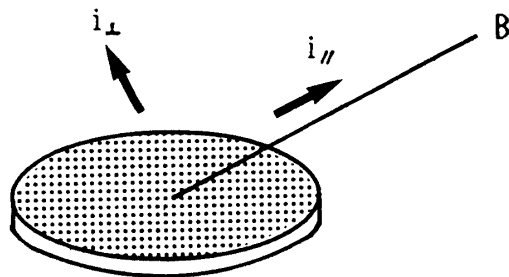


図 2 おおぞら衛星に搭載された電子温度プローブと磁力線の方向。ただし、円盤プローブの周辺については成立しないが電子温度プローブのシミュレーションではプローブ周辺の影響については考慮していない。

この現象を議論するためにコンピュータ・シミュレーションにより電子温度プローブの特性を調べた。おおぞら衛星に搭載された電子温度プローブは直径 110 mm の平板プローブであり、このプローブに対し磁力線が角度 ( $\theta$ ) で入り込んでいるとする(図 2)。電子エネルギー分布は磁力線に平行な方向及び垂直な方向にそれぞれ異なったマクスウェル分布をしていると仮定すると電子温度プローブに入り込む電流は磁力線に平行な電流 ( $I_{\parallel}$ ) と垂直な電流 ( $I_{\perp}$ ) に分離することができ、全電流 ( $I$ ) は

$$I = I_{e\perp} \cos \theta + I_{e\parallel} \sin \theta - I_i \quad (1)$$

と表すことができる。ここで

$$I_{e\parallel} = I_{0e\parallel} \exp(eV/kT_{e\parallel}) I_0(ea/kT_{e\parallel})$$

$$I_{e\perp} = I_{0e\perp} \exp(eV/kT_{e\perp}) I_0(ea/kT_{e\perp})$$

$$I_{0e\parallel} = S \cdot N_e \cdot e \cdot \sqrt{kT_{e\parallel}/2\pi m_e}$$

$$I_{0e\perp} = S \cdot N_e \cdot e \cdot \sqrt{kT_{e\perp}/2\pi m_e}$$

である。 $I_i$  はイオンによる電流、 $V$  はプローブの電位、 $S$  はプローブの表面積、 $N_e$  は電子密度、 $T_{e\parallel}$  と  $T_{e\perp}$  は磁力線に平行な電子温度及び垂直な電子温度をそれぞれ示している。 $I_0$  は変型ベッセル関数であり、 $a$  はプローブに加えた 30 kHz の交流の振幅である。 $m_e$ ,  $e$  及び  $k$  は電子の質量、電荷及びボルツマン常数である。電離層イオンの熱速度は約 1 km/sec であることから、約 7 km/sec の速度で飛行しているおおぞら衛星に搭載された電子温度プローブに入り込むイオン電流はイオン密度及び衛星の速度で決定され、磁力線の影響は受けないと考えられる。おおぞら衛星に搭載された電子温度プローブを用いた電子温度の測定は電子のエネルギー分布は等方的であることを仮定することにより、プローブに入り込んだ全電流から次式を用いて求めている。

$$I = I_e \exp(eV/kT_e) I_0(ea/kT_e) - I_i \quad (2)$$

ここで

$$I_e = S \cdot N_e \cdot e \cdot \sqrt{kT_e/2\pi m_e}$$

である。電子温度プローブは交流を印加した時と印加しない時の浮動電位を測定し、おおぞら衛星に搭載されたコンピュータにより他の観測データとともに編集され地上へ伝送されている。したがって(2)で  $I=0$ ,  $a=0$  とした時の浮動電位  $V_F$  と  $I=0$ ,  $a \neq 0$  とした時の浮動電位  $V$  をそれぞれ測定し  $T_e$  を求めている。

図 1 のデータでは浮動電位は  $V_F = -1.176$ (V) であり観測期間中ほぼ一定であった。したがってこの値を用い  $T_{e\parallel}$ ,  $T_{e\perp}$ ,  $\theta$  及び  $a$  を与えることにより(1)から浮動電位  $V$  を計算することができる。この  $V_F$  と  $V$  を用いて(2)から電子温度の特性が調べられた。 $a = 250$  mV または  $500$  mV とした時の計算結果を図 3 に示す。電子温度プローブと磁力線と

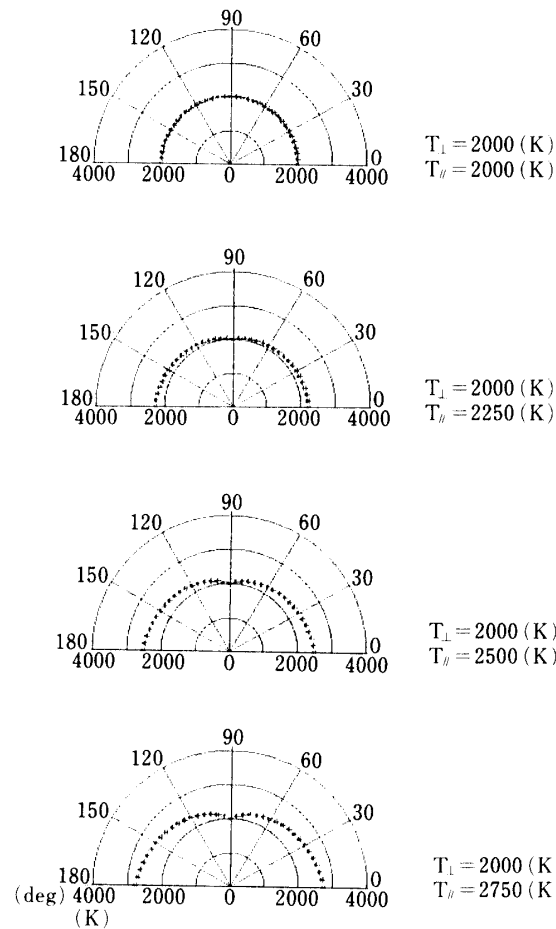


図3 電子温度の特性. 電子温度が磁力線と電子温度プローブの法線とのなす角度の関数として示されている.

のなす角度と温度に対してプロットされている。マクスウェル分布を仮定しているために交流の振幅(a)による相違はあらわれていない。磁力線に平行な温度を増加させると、電子温度プローブは磁力線方向で温度の高い非等方性を示すようになり、非等方性が大きい時90度付近で温度が減少する構造が得られるようになる。これは磁力線に平行な方向の温度の高いプラズマがプローブに入り込むと、電子温度測定器は温度の高いプラズマの影響を強く受けることを示している。

計算と観測との比較を図4に示す。観測された電子温度は磁力線方向で高く、角度90度付近で電子温度の減少を示す時がある。磁力線方向の電子温度が高いと仮定することにより得られた計算結果と観測との間にはよい一致がみられる。また、磁気緯度に対し電子温度を統計的に解析したものを図5に示す。ただしすべての地方時で平均されている。磁気緯度50度以上の時、温度の異方性が顕著に現れている。 $T_{e\parallel}$ を3600 K、 $T_{e\perp}$ を2700 Kとした時の計算結果と観測はよく一致している。これらの結果は電子温度の非等方性の事実を強く示唆するものであり、非等方性は高緯度域に主に存在することを示している。

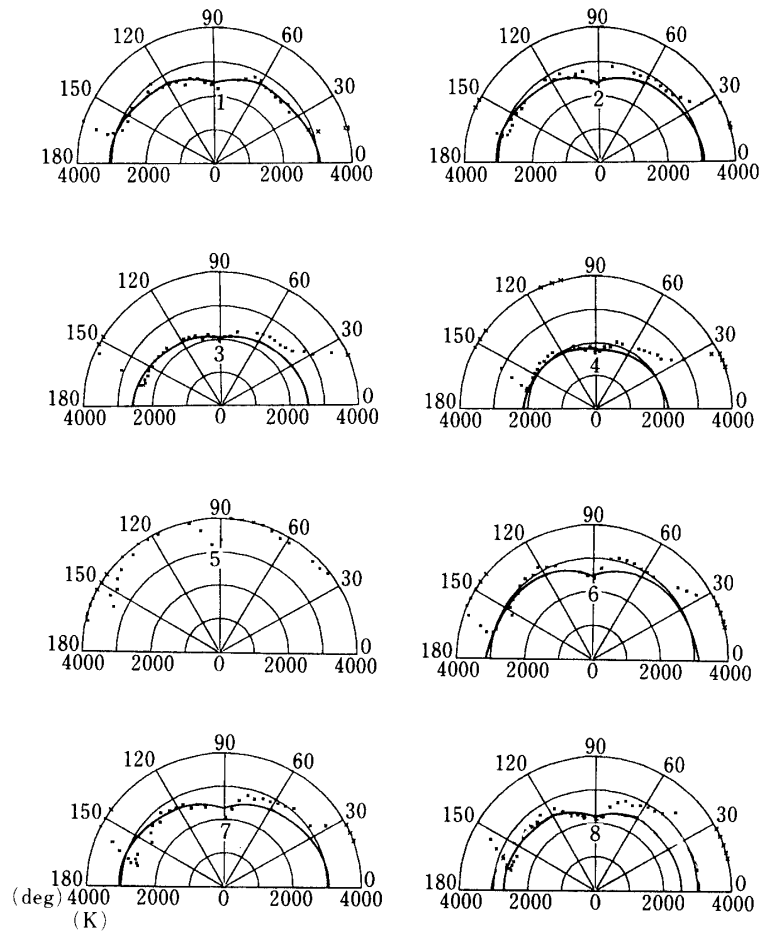


図4 電子温度の計算とおおぞら衛星に搭載された電子温度の観測との比較。電子温度が4000 K付近のデータは電子温度プローブが衛星のウェイク中に入ったときのものである。図中3, 4, 7及び8で磁力線方向の電子温度が高く測定されている。これらのデータは北半球で測定されていたことから磁気圏からの熱輸送に起因するものと考えられる。

### 3. 基礎方程式

電子温度の非等方性に関する数値計算は、磁力線に平行な電場によるジュール加熱及び磁気圏からの熱輸送が電子温度の非等方性にとって高緯度域では重要であることを示唆している (Klinberg and Klimov, 1970; Konikov and Khazanov, 1981; Konikov et al., 1983; Konikov and Khazanov., 1984; Gorbachev et al., 1984; Khazanov et al., 1984).

しかし、これらのメカニズムによる電子の加熱では電子のエネルギー分布はマクスウェル分布からずれているはずである。そこで我々は、ボルツマン方程式を直接解くことにより電子のエネルギー分布を計算し電子温度の非等方性を議論した。

クーロン散乱によるボルツマン方程式のコンピュータ・シミュレーションは1次元モデ

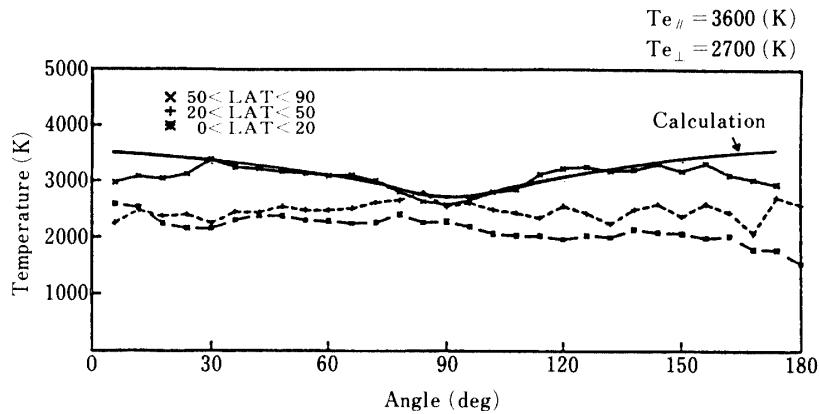


図5 電子温度非等方性の磁気緯度依存性。おおぞら衛星で測定された電子温度をすべての地方時で平均し、低、中及び高緯度ごとに電子温度の非等方性を調べたものである。低、中緯度では電子温度の非等方性は明瞭ではないが、高緯度では顕著に現れている。 $T_{\parallel}$  及び  $T_{\perp}$  を 3600 K 及び 2700 K としたときの計算結果と高緯度での電子温度との比較を同時に示している。

ルとして MacDonald et al. (1957) によりはじめて行われた。我々は同様の方法を2次元に拡張し、電離圏F層上部の電子に対して適用した。そのボルツマン方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + e/m_e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = \delta f / \delta t \quad (3)$$

ここで

$$\begin{aligned} \delta f / \delta t = & - \sum_{s=1,e} 2\pi/m_e (e \cdot e_s / 4\pi\epsilon_0)^2 \ln \Lambda \frac{\partial}{\partial \vec{v}} \cdot \int U_{\alpha\beta} (f(\vec{v}) / m_s \cdot \partial f_s(\vec{v}_1) / \partial \vec{v}_1 \\ & - f_s(\vec{v}_1) / m_e \cdot \partial f(\vec{v}) / \partial \vec{v}) d\vec{v}_1 \\ U_{\alpha\beta} = & (g^2 - \vec{g}_\alpha \vec{g}_\beta) / g^3, \quad \vec{g} = \vec{v} - \vec{v}_1 \end{aligned}$$

である。 $f$  は電子の分布関数であり、 $f_s$  は電子及び酸素イオンの分布関数を示している。 $v$  及び  $v_1$  は粒子の速度ベクトルであり  $g$  はそのベクトル差である。 $\alpha$  及び  $\beta$  は速度ベクトル成分を示している。 $E, B, m, \epsilon_0, \Lambda$  はそれぞれ電場、磁場、質量、真空中の誘電率、クーロン対数である。衝突項はランダウの衝突積分と呼ばれるものであり、粒子の分布が空間的に一様であると仮定することにより得られている。衝突積分は電子-電子、電子-酸素イオンに対して行われた。

#### 4. シミュレーション結果

0.5~1.0秒の間、磁力線方向に  $10^{-6}$  V/m の電場を加えた時のシミュレーション結果を

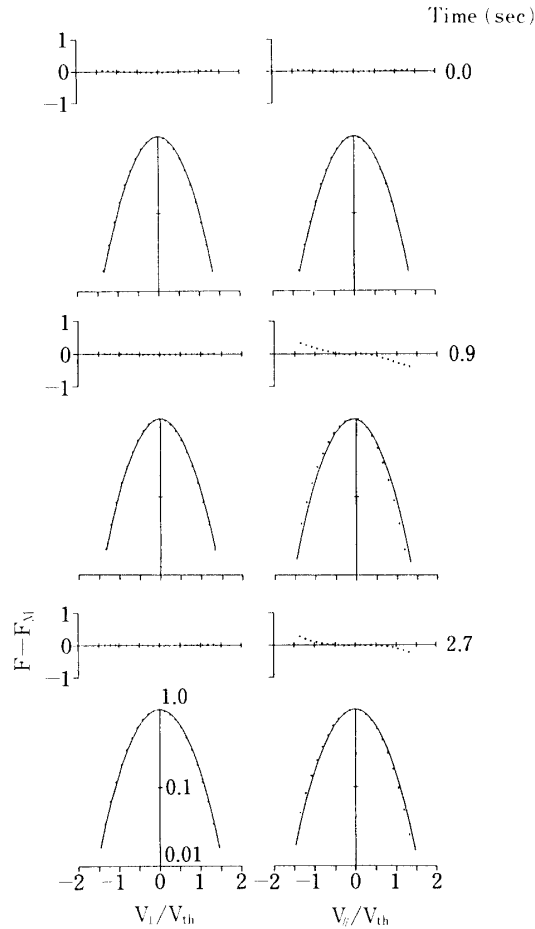


図 6 磁力線に平行な電場を加えた時の電子のエネルギー分布。  
 $10^{-6}$  V/m の電場が 0.5~1.0 秒の間磁力線に平行に加えられている。分布関数は最大値を 1.0 としている。速度 0 m/sec を含む磁力線に平行な速度 ( $V_{\parallel}$ ) 及び垂直な速度 ( $V_{\perp}$ ) は熱速度 ( $V_{th}$ ) を単位として表示されている。点線はシミュレーションによる結果を示し、実線はシミュレーションによる熱速度以下のデータから最小二乗法でマクスウェル分布に一致させたもの示している。 $F-F_M$  はマクスウェル分布からのずれを示している。電場は磁力線方向に加えてあるために、電子は磁力線に対し反対方向に加速されていることがわかる。また、速度が大きいほどマクスウェル分布からのずれが顕著になっていることがわかる。

図 6 に示す。初期条件として電子のエネルギー分布は 2000 K のマクスウェル分布とした。酸素イオンは 2000 K のマクスウェル分布であるが、シミュレーション中その分布は一定に保たれている。シミュレーションによるデータを点線で示し、最小 2 乗法で一致させたマクスウェル分布を実線で示している。 $F-F_M$  は両者のずれつまりマクスウェル分布か



らのずれを示している。磁力線方向の電場を加えることにより磁力線方向の電子の速度成分が変化している。熱速度付近のデータからマクスウェル分布を仮定することにより求められた温度が時間と共に変化する様子を示したものが図7である。ジュール加熱により温度が上昇すると同時に、温度の異方性が顕著になりその大きさ、 $T_{\parallel}/T_{\perp}$ は約1.3ほどになる。その後クーロン散乱により等方的な分布に移行している。シミュレーションではイオンの分布は変化しないと仮定されているので電子からイオンへのエネルギーの移動は考慮されていない。したがって電子温度は電場からエネルギーをもらい電子温度が増加したマクスウェル分布へと移行し定常状態となっている。

空間的な温度勾配による電子エネルギー分布の影響は、磁力線方向のシミュレーション領域の外側にシミュレーション領域のプラズマとは異なった温度を持つマクスウェル分布を想定することにより行われた。空間的な温度勾配が存在する時、電場が存在する時と同様に非等方的な分布となる。これらの非等方性の大きさは電子の衝突周波数に強く依存している。したがって、非等方性は電子密度に強く依存することになる。その結果を図8に示す。ここで温度勾配は特性的な距離を変化させることにより得られ、電子温度は熱速度以下のデータからマクスウェル分布を仮定することにより得られている。電子密度の増加と共に非等方性が小さくなることが明らかに示されている。図6、7及び8に示す非等方性の大きさの相違は、エネルギーの高い領域ほどマクスウェル分布からのずれが顕著になることが原因となっている(図6)。これはクーロン散乱による衝突断面積がエネルギーに反比例していることに起因している。おおよそ衛星による電子温度の測定は浮動電位を測定することにより得られている。したがって、浮動電位付近では電子のエネルギー分布は磁力線に平行な電場あるいは熱輸送が存在する時、マクスウェル分布からはずれることが

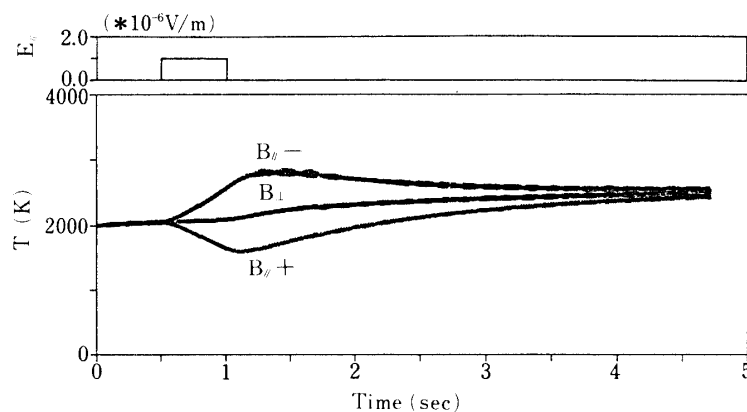


図7 磁力線に平行な電場を加えた時の電子温度の時間変化。シミュレーションによる熱速度付近のデータから最小二乗法でマクスウェル分布に一致させ、求められた電子温度を示している。 $B_{\parallel}^+$ 、 $B_{\parallel}^-$ 及び $B_{\perp}$ は磁力線方向の電子温度、磁力線に反対方向の電子温度及び磁力線に垂直な方向の電子温度をそれぞれ示している。

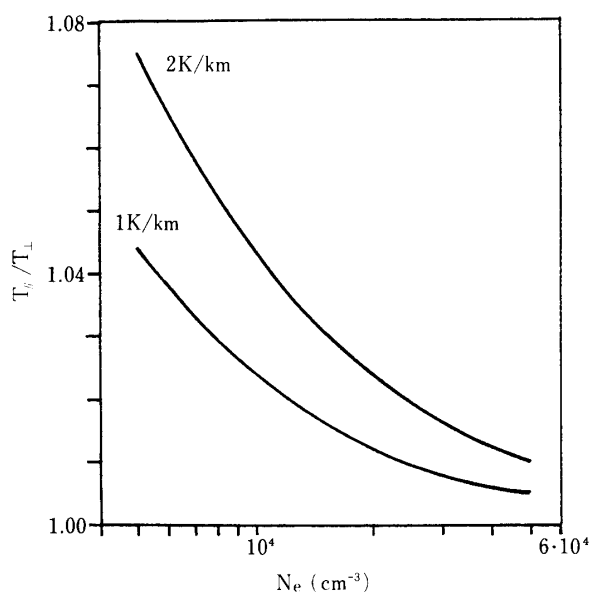


図 8 温度勾配が存在するときの電子温度の非等方性と電子密度との関係。電子温度は熱速度以下のデータから最小二乗法でマクスウェル分布に一致させることにより得られた。非等方性が小さいのは熱速度以下のデータから求めたことによる。

あることをコンピュータ・シミュレーションは示唆している。

## 5. 議論及び結論

ボルツマン方程式を用いた電離層電子のエネルギー分布のコンピュータ・シミュレーションから、電場及び空間的な温度勾配が存在する時、電離層電子のエネルギー分布は、非等方的な分布になることが明かとなった。さらに、エネルギー分布の非等方性はプラズマの密度に強く依存することも示された。これらの結果は、オーロラ領域及びトラフ領域で電子温度分布の非等方性が生成されやすいことを示唆している。高緯度域で観測された電子温度を図9に示す。17:16~17:24(UT)及び17:36~17:39(UT)のトラフ領域では非等方性が連続的に観測されているのに対し17:28~17:35(UT)のオーロラ領域では不規則な構造を示している。この相違は非等方性のメカニズムが異なることを示唆している。コンピュータ・シミュレーションで示したようにどちらのメカニズムがトラフ領域及びオーロラ領域で重要であるかは、高緯度域における電子の低エネルギー分布の測定及び電場の測定とシミュレーションとの比較から明らかにされるものと考えている。

## 謝 辞

電子温度の測定はおおぞら衛星により得られたものである。この衛星のマネジャーである伊藤富造教授及びプロジェクトサイエンティストである大家寛教授に心から感謝の意を表するものである。また衛星に直接、間接に関った多くの方々に深く謝意を表する。

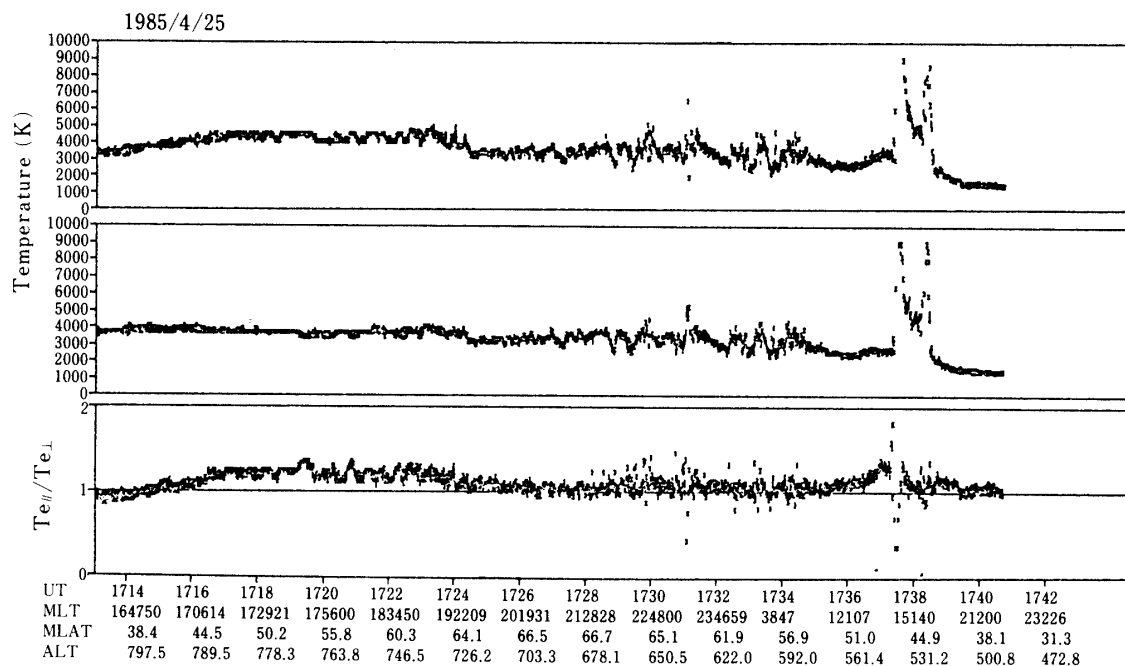


図9 極域で観測された電子温度の非等方性。おおぞら衛星に搭載された3個の電子温度プローブのうち直交する2個の電子温度プローブのデータが表示されている。磁力線に対する電子温度分布が $T_{\parallel}$ 及び $T_{\perp}$ で決定されるようなマクスウェル分布を仮定することにより2つのデータを用いて計算された非等方性の割合( $T_{\parallel}/T_{\perp}$ )を同時に示している。UT, MLT, MLAT, ALTは世界時(時分), 磁気地方時(時分), 磁気緯度(度), 高度(km)をそれぞれ示している。

### 参考文献

- Clark, D. H., W. J. Raitt, and A. P. Willmore, A measured anisotropy in the ionospheric electron temperature, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, 63-76, 1973.
- Fester, M., A. Best, D. Yokhanning, V. Seyfert, and Y. A. Shmilauer, Comparison of measurements of the electron temperature performed with three probes on board the Intercosmos-18 satellite, *Geomag. Aeron.*, **24**, 760-765, 1984.
- Dumbs, A., and E. Neske, High latitude ionospheric structures, *Space Res.*, **19**, 313-316, 1978.
- Gorbachev, O. A., Yu. V. Konikov, and G. V. Khazanov, Temperature anisotropy in the earth's plasmasphere caused by magnetosphere convection, *Geomag. Aeron.*, **24**, 129-131, 1984.
- Khazanov, G. V., M. A. Koen, Yu. V. Konikov, and I. M. Sidorov, Simulation of ionospheric-plasmasphere coupling taking into account ion inertia and temperature anisotropy, *Planet. Space Sci.*, **32**, 585-598, 1984.
- Konikov, Yu. V., and G. V. Khazanov, Estimate of the anisotropy of the electron temperature in the mid-latitude ionosphere and plasmasphere of the Earth, *Geomag. Aeron.*, **21**, 740-742, 1981.

- Konikov, Yu. V., and G. V. Khazanov, Anisotropy of the charged-particle temperatures in the ionosphere and plasmasphere, *Geomag. Aeron.*, **24**, 37-42, 1984.
- Konikov, Yu. V., and G. V. Khazanov, Equations of anisotropic hydrodynamics for electron component of the ionospheric plasma, *Planet. Space Sci.*, **31**, 91-98, 1983.
- Konikov, Yu. V., I. M. Sidorov, and G. V. Khazanov, Modeling of ionospheric-plasmaspheric interactions including temperature anisotropy, *Geomag. Aeron.*, **23**, 190-193, 1983.
- Krinberg I. A., and N. N. Klimov, Possible electron temperature anisotropy in the lower ionosphere, *Geomag. Aeron.*, **10**, 649-652, 1970.
- Likhter, Ja. I., V. I. Larkina, Yu. M. Mikhailov, V. V. Afonin, G. L. Gdalevich, K. B. Serafimov, L. G. Bankov, Ts. P. Dachev, N. S. Trendafilov, F. Tiricek, J. Smilauer, P. Triska, and J. Vojta, ELF-VLF emissions, ion density fluctuations and electron temperature in the ionospheric trough, *Space Res.*, **19**, 339-342, 1979.
- MacDonald, W. M., M. N. Rosenbluth, and W. Chuck, Relaxation of a system of particles with coulomb interactions, *Phys. Rev.*, **107**, 350-353, 1957.
- Oya, H., and R. F. Benson, A new method for in situ electron temperature determinations from plasma wave phenomena, *J. Geophys. Res.*, **77**, 4272-4276, 1972.
- Oyama, K. I., and K. Schlegel, Observation of electron temperature anisotropy in the ionosphere: A review, *Ann. Geophys.* 1988, **6**, 389-400, 1988.
- Oyama, K. I., and T. Abe, Anisotropy of electron temperature in the ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 1195-1198, 1987.
- Oyama, K. I., K. Hirao, and F. Yasuhara, Electron temperature probe onboard Japan's 8th scientific satellite OHZORA, *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 413-430, 1985.
- Schunk, R., and D. Watkins, Electron temperature anisotropy in the polar wind, *J. Geophys. Res.*, **86**, 91-102, 1981.
- Wrenn, G. L., D. H., Clark, W. J. Raitt, and H. C., Carlson, Modulation Langmuir probe and incoherent scatter radar measurements of ionospheric electron temperature, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, 405-413, 1973.