

あけぼの衛星電子温度観測からみたプラズマ圏の熱的構造

蜂谷宣人（東京理科大）、阿部琢美（ISAS/JAXA）

概要

超高層大気における電子温度は、地球電離圏やプラズマ圏のエネルギー収支を調べる上で重要なパラメータであり、観測と理論の両面において研究がなされてきていたが、その中で低・中緯度の内部プラズマ圏についてはほとんど調べられていない。1989年に文部省宇宙科学研究所（現 ISAS/JAXA）が打ち上げたあけぼの衛星の熱的電子エネルギー分布測定器（TED）は高度 300～10000 km までの電子温度を打ち上げ以来 21 年にわたって観測し続け、そのデータは内部プラズマ圏の解析に適している。本研究ではあけぼの衛星の電子温度観測データを用いてプラズマ圏中のエネルギー収支、特に熱源の存在の可能性について議論を行った。

1. 序論

1.1 プラズマ圏

地球の上層大気には、電氣的に中性な分子や原子のほかに、これらが電離してつくられる電離気体（プラズマ）が存在する。主な電離源は、太陽から放射されるX線や銀河宇宙線などである。プラズマ圏領域ではH⁺などの軽イオンや電子が支配し、温度は約 1000～10000 Kである。密度は高度 1000 km付近で約 10⁴/ccほどであり高度とともにゆっくりと減少していくが、高度 3Re～4Reで急激に減少していることが電波観測や衛星観測などから明らかになった。これはプラズマポーズと呼ばれ、プラズマ圏と磁気圏の境界を表している。

1.2 プラズマ圏の電子温度観測

現在のところ高度 4000 km を超える電子温度モデルはほとんど存在しない。原因としては、電子密度が低いためにレーダー観測ではエコー強度が不十分、衛星観測にとっても測定器(Langmuir Probe)が得る電子電流が小さいために信頼性のある観測が困難であったこと等が挙げられる。

プラズマ圏電子温度に関しては 1976 年に遠地点高度 8046 km の S3-3 衛星による観測がなされ、主に夕方の電子温度高度プロファイルが得られた[Rich et al., 1979]。その結果、5000 km 以上の高度では、不変磁気緯度 47 度(L=2.15)付近において電子温度が磁力線に沿ってほぼ等温になっていること、同 70 度付近(L=8.55)の極域においては高度 5000 km でも約 0.14 K/km 程度の高度勾配をもつことなどが観測された。しかし、観測期間が約 2 ヶ月と短かったことで観測領域が大きく制限され、モデルを作成できるほどのデータは得られなかった。

あけぼの衛星に搭載された熱的電子エネルギー分布測定器(TED)は、半円状の平板プローブを用いて表面に金メッキを施し、またプローブを太陽方向と常に垂直に姿勢制御することにより、極力二次電子の影響を取り除くことが出来た。これによって、TED は高度 400 km～10000 km の領域を打ち上げ以来観測し続け、プラズマ圏の電子温度分布の長短周期の特徴を映し出すことの出来る最初の衛星となった。

1.3. TED（熱的電子エネルギー分布測定器）

TED はプラズマ中の熱的電子のエネルギー分布ないし温度の計測を行うものである。従来の熱的電子の観測がマクスウェル分布の前提の下に電子温度という概念で把握されていたのに対し、TED はエネルギー分布の詳細を測定すること及び磁力線の向きに対する異方性を検出することに主眼を置いている点にユニークさがある。TED の観測対象は 0～5eV の熱的エネルギーをもつ電子である。センサーとしては、光電子の影響を極力抑えるために金メッキを施したプローブを用いる。プローブ形状は、半円状電極を円形に配置したもので、直径 10cm、2 枚の円盤をお互いに 10mm 離すことによって形成されている。

2. プラズマ圏の電子温度プロファイル

図 2.1 はあけぼの衛星TED観測データの中で統計的手法により得られた平均的なプラズマ圏内電子温度の高度プロファイルで、太陽活動度極大(1989.3 - 1992.6)、磁気活動度(Kp指数:2以上4未満)、磁気地方時(MLT:06-18)という条件のものである。電子温度は高度 200 kmごとの平均、高度 10000 kmまでを示している。プラズマ圏には中性大気が少なく、電子密度はある程度存在する ($10^3 \sim 10^4$) ため熱伝導度が良く、磁力線沿いにほぼ等温であると考えられていたが高度 3000 km以上の領域で電子温度に高度方向の勾配がみられる。

しかし、電子温度の高度プロファイルは昼側、夜側でそのプロファイルは大きく異なっている。昼側のプロファイルは高度 3000 km 以上の領域であっても高度勾配を持っているのに対し、夜側のプロファイルは一定の高度勾配はみられない。右はその比較である。グラフ条件は図 2.1 が太陽活動度極大(1989.3 - 1992.6)、Kp 指数(0-4未満)、昼側 (MLT:10-14) で 図 2.2 が夜側 (MLT:22-02) のプロファイルである。

夜側のプロファイルでは高度 3000 - 8000 km において局所的な変化は見られるが、昼側に見られるような大規模な温度勾配は見られない。また、図 2.1、図 2.2 における各プロファイルはそれぞれ不変磁気緯度 20, 30, 40, 50 度における電子温度をあらわしているが、高緯度ほど温度が高いことが伺える。

3. プラズマ圏内電子温度とヒートフラックス

プラズマ圏は高度 3000 km 以上でほぼ等温と考えられていたが、TED 観測データによれば電子温度は高度勾配を持っていた。これは、高い高度に熱源が存在し下方へ熱伝導している可能性を示唆している。熱伝導の大きさはヒートフラックス (Heat Flux)により表わされるので、この値に注目した。プラズマ圏における古典的な熱伝導係数 (Spitzer-Harm 式) とヒートフラックスの関係については付録に詳しく述べる。

3.1 ヒートフラックスの高度プロファイル

図 3.1 は TED 観測による電子温度から導き出したヒートフラックスの高度に対する変化で、それぞれ同一磁力線内での値を示している。条件としては太陽活動度極大(1989.2 - 1992.6)、Kp 指数:0-4 未満で、左図が昼側(MLT:10-14)、右図が夜側(MLT:22-24, 00-02)を表す。ここでのヒートフラックスは高度 200 km ごとの平均値である。範囲は電子温度の高度プロファイルにおいて高度 3000 km 以上での高度勾配に着目するために、高度は 8000 km までとした。

図 3.1 をみると、高緯度ほどヒートフラックスの値が大きいことがわかる。またヒートフラックスの昼側(MLT:10-14)と夜側(MLT:22-24, 00-02)の比較では、不変磁気緯度 20, 30, 40 度において昼側が夜側より大きな値を示していることがわかる。

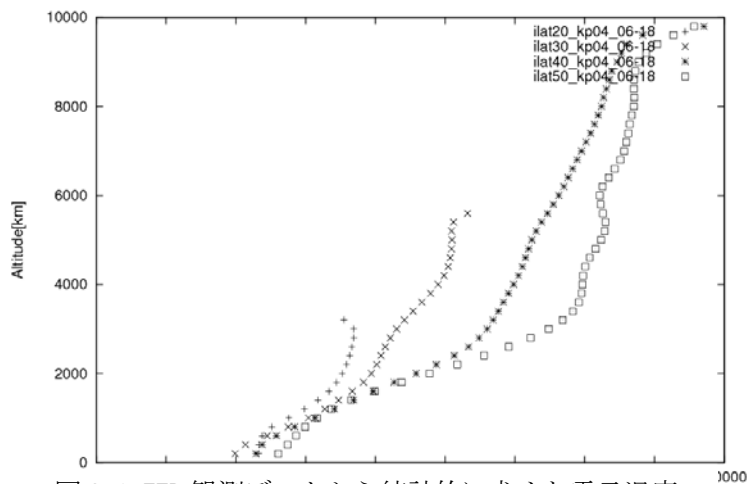


図 2.1 TED 観測データから統計的に求めた電子温度の高度プロファイル (日中のデータ)

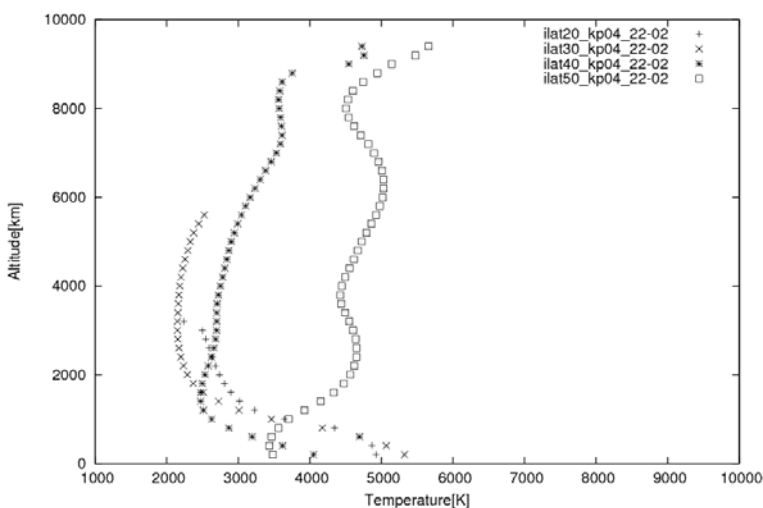


図 2.2 TED 観測データから統計的に求めた電子温度の高度プロファイル (夜間データ)

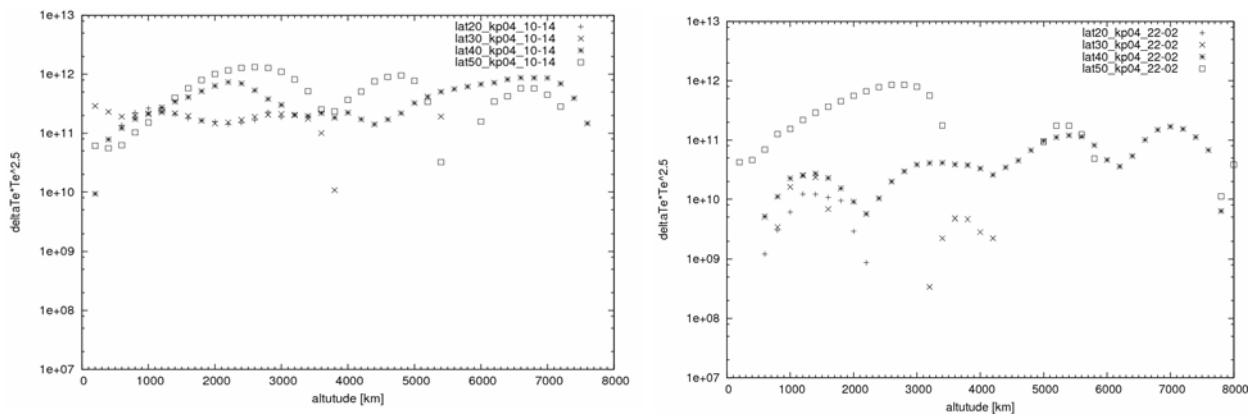


図 3.1: TED の電子温度観測データから算出したヒートフラックス（太陽活動度極大(1989.2 - 1992.6), Kp 指数:0-4 未満) 左側：昼間(MLT:10-14)、右側：夜間(MLT:22-02)

同一磁力線上に熱エネルギーの局所的なソースやロスがなければ、ヒートフラックスは一定となるはずである。これに対して、図 3.1 でヒートフラックスは高度領域に対する変化を示している。この理由については以下の 2 つの可能性が考えられる。

- (1) 熱伝導度(Spitzer-Harm 式)を表す式がプラズマ圏のような低電子密度において適用できず誤っている。あるいはプラズマ圏に存在する何らかのプロセスが古典的な熱伝導係数を変化させている。
- (2) プラズマ圏内で局所的に存在する熱のソースやシンクが高度プロファイルにおけるヒートフラックスの変化をつくりだしている。

(1)は、電離度の高いプラズマに対して一般に用いられる熱伝導係数がプラズマ圏においては成立しない場合で、これはこれまでの一般常識と異なる。逆に考えるとプラズマ圏内の熱伝導係数を表す正しい式が用いられればヒートフラックスは一定となるはずである。熱伝導係数が一般的な表現式と異なる理由としてはプラズマ圏の低い電子密度のほか、例えばプラズマ波動中の電場が電子間衝突を妨げる効果が要因として考えられる。プラズマ波動の存在に関しては、あけぼの衛星のプラズマ波動観測データを用いた比較が可能であるが、これは今後の課題である。

(2)は、熱伝導係数の表現式は正しいが、同一磁力線内で局所的な加熱やロスが発生するためにヒートフラックスのプロファイルが凹凸を伴うものである。これは、熱エネルギーが局所的に発生あるいは消失していることを意味している。

プラズマ圏内で生じる局所的な加熱については、例えば低高度で発生した光電子がプラズマ圏に移動した後に熱的電子を加熱する可能性が第一に考えられるので、さらに解析を進めることとする。光電子の生成は主に太陽放射と関連があるため、磁気地方時(MLT)や太陽活動度に対するヒートフラックスの変化をみていくことで手掛かりが得られるかもしれない。また、不変磁気緯度に応じたヒートフラックスの変化も参考までに調べることにする。

3.2 ヒートフラックスに関する議論

3.2.1 ヒートフラックスの緯度変化

図 3.1 に示されるようにヒートフラックス(Q)は高緯度ほど大きな値を示し、高緯度ほど大きな熱エネルギー源と接していることが予想される。以下は、不変磁気緯度が 10 度毎のヒートフラックスと、不変磁気緯度 20 度におけるヒートフラックスの値を 1 としたときの比をまとめたものである。

表 3.1 太陽活動度極大, 昼側ヒートフラックス (5000 km 以下の平均値) の緯度依存性

緯度	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60
Q(Lat*)	1.40E+11	2.02E+11	3.32E+11	6.03E+11
Q(Lat*)/Q(Lat20)	1	1.44	2.37	4.30

3.2.2 ヒートフラックスの磁気地方時(MLT)による変化

光電子がプラズマ圏内の部分的な加熱に何らかの形で寄与している可能性を探るために、ヒートフラックスの磁気地方時による変化に着目する。

図 3.2 は不変磁気緯度 50-60 度の範囲のヒートフラックス平均値（高度 5000 km までの平均）の磁気地方時(MLT)に対する変化である。磁気地方時(MLT)は 3 時間ごと（0 時±1.5 時間、3 時±1.5 時間、…）とした。

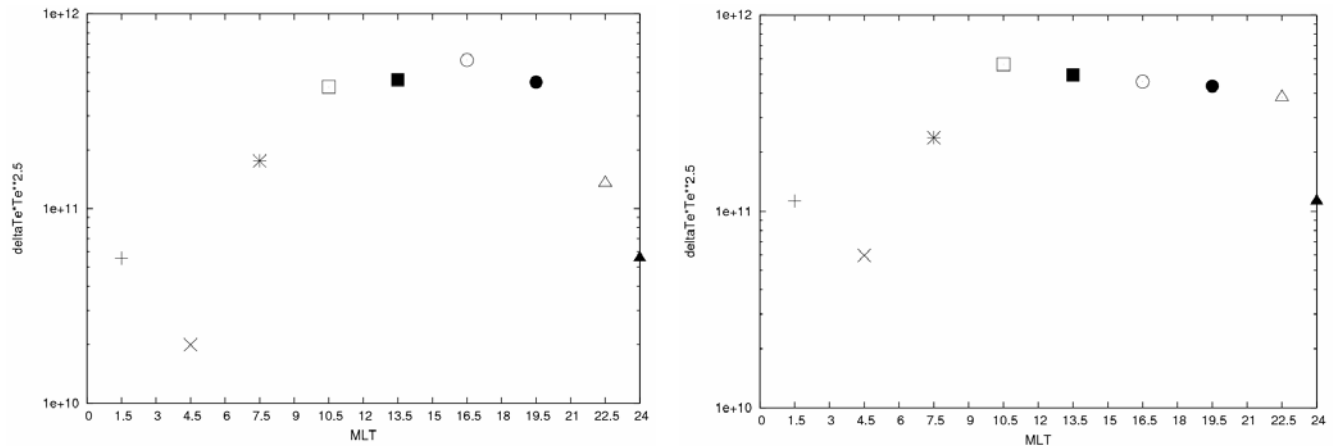


図 3.2 ヒートフラックス平均値の磁気地方時(MLT)による変化

(左側：太陽活動度極大期(1989.2 - 1992.6)、右側：太陽活動度極小期(1992.7 - 1998.2))

太陽活動度極大期の結果に着目すると、明け方の 3 時±1.5 時間におけるヒートフラックス値がもっとも小さく、日中は大きく明け方の 10 倍以上の値を示している。

ヒートフラックス値は明け方において急激に上昇したが、一方夕方での減少は緩やかである。このことは、明け方は電子密度が低いので光電子から受けとる熱電子一個あたりのエネルギーが大きくなるということが理由であるかもしれない。また、夕方での緩やかなヒートフラックス値の減少は、熱エネルギーが徐々に下方に輸送されて光電子が生成されなくなった後にプラズマ圏がゆっくりと冷却していく様子を示しているのかもしれない。

3.3 太陽活動度依存性による変化

太陽活動度変動に伴い地球に入ってくる輻射エネルギー量が異なるので、生成される光電子が変化し、熱的電子の加熱量が変化するかもしれない。このような考えのもと、太陽活動極大期のヒートフラックス値と極小期の値の比を求め、その磁気地方時による変化を調べた（表 3.2）。

地方時が 15±1.5 時と 18±1.5 時の場合を除いて極大期と極小期の比は 1 を超え、極大期のヒートフラックスが卓越する事を示しているとなっている。夜間は電離圏にほとんど太陽輻射エネルギーが入らないので極大と極小で大きな差が生じることは考えにくい、これは日中に蓄えられたエネルギーが夜間に下方に向けて伝導されるプロセスに起因して生じている傾向かもしれない。

表 3.2 太陽極大期／極小期のヒートフラックスの比率の磁気地方時（MLT）による変化

MLT	0.0±1.5	3.0±1.5	6.0±1.5	9.0±1.5	12. ±1.5	15. ±1.5	18. ±1.5	21. ±1.5
Q(極大期) /Q(極小期)	2.03	2.99	1.35	1.33	1.08	0.79	0.98	2.83

4. 議論とまとめ

本研究ではあけぼの衛星搭載熱的電子エネルギー分布測定器の取得データをもとにプラズマ圏電子温度分布に関する解析を行った。特に電子温度の高度プロファイルから求められるヒートフラックスに注目して幾

つかの側面から議論を行った。結果は次のようにまとめられる。

1) ヒートフラックス の不変磁気緯度に対する変化

高緯度ほどヒートフラックス値が大きい。このことは、高緯度ほどより大きな熱エネルギー源と接していることを示唆する。

2) ヒートフラックスの磁気地方時に対する変化

緯度 50-60 度でヒートフラックスの磁気地方時 (MLT) による変化を調べたところ、昼側のほうが夜側よりも 1 桁以上大きいことがわかった。

ヒートフラックス値は明け方において急激に上昇したが、夕方での減少は比較的緩やかであった。これは、明け方は電子密度が低く光電子から受けとる熱電子 1 個あたりのエネルギーが大きくなるということ理由として考えられる。また夕方での緩やかなヒートフラックス値の減少は、日中プラズマ圏に蓄えられた熱エネルギーがゆっくりと下方へ伝導していく様子を表しているかもしれない。

太陽活動極大期と極小期のヒートフラックスを比較した結果、磁気地方時が 15 ± 1.5 時と 18 ± 1.5 時の場合を除き、極大期の値が大きいという結果になった。このことは太陽からのエネルギー入射量とヒートフラックスの間に関連性があることを示している。

これは光電子が何らかの形でプラズマ圏熱的電子の加熱に寄与している可能性を示唆している。

5. 今後の課題

本報告では、プラズマ圏電子温度分布から求められるヒートフラックスについての初期解析結果、および結果から推測される物理過程について言及した。今後は太陽活動度の極大極小時での太陽放射量のプロファイルを作成し、今回の結果と比較することにより、太陽輻射量とヒートフラックスの相関をより詳しく確かめる。

いっぽう、プラズマ圏内で用いる熱伝導係数の妥当性については電子温度データに加えてプラズマ波動データを参照しながら、検討を加える予定である。

いずれにしても、本解析は開始して間もなく、今後さらに詳細な議論を進めていく予定である。

付録

ヒートフラックス (Heat Flux) の導出について

マクスウェルの速度分布則から平均自由行程を考えると、熱伝導係数は $K_e = \frac{9k}{\pi} \sqrt{\frac{2}{m\pi}} \frac{(kT_e)^{2.5}}{e^4 \ln \Lambda}$

で与えられる (Spitzer-Harm 式)。ここで、 k はボルツマン定数、 m , e はそれぞれ電子の質量、電荷である。 $\ln \Lambda$ はクーロン積分で、大気成分や密度により変化する [Banks, 1966a, b]。

これらの値を上部電離圏およびプラズマ圏に対応して数値化させたものが、次の式 (A-1) である。

$$K_e = 7.2 \times 10^5 T_e^{2.5} \frac{1 + \log \left[\frac{h}{h_0} \right]}{1 + 1.5 \log \left[\frac{h}{h_0} \right]} \quad [\text{eV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (\text{A-1})$$

$$J = \sigma_e \left[E + \frac{kT_e}{eN_e} \nabla N_e \right] + \tau_e \nabla T_e \quad (A-2) \quad q_e = -\mu_e \left[E + \frac{kT_e}{eN_e} \nabla N_e \right] - K_e \nabla T_e \quad (A-3)$$

熱伝導は電子温度に強く依存していることがわかる。 h_0 は基準高度である。電子のヒートフローに関しては、エネルギー (A-2) およびヒートフロー (A-3) の方程式で与えられる。ここで、 σ_e は電気伝導度、 τ_e は電子密度一定のときの温度勾配による電流伝導度、 μ_e は電場による熱流伝導度である。電離圏電場Eを消去すれば

$$q_e = -\beta_e J - K^e \nabla T_e \quad (\text{ただし } K^e = K_e - \beta_e T_e, \beta_e = \frac{\mu_e}{\sigma_e} \text{ は熱電的な輸送係数})$$

が得られる。上部電離圏では電流を打ち消すように偏極電場ができるため、電流は流れない ($J = 0$)。結局、ヒートフローは次の式のようになって、熱伝導度と温度勾配のみに依存する [Schunk and Nagy, 1987]。

$$q_e = -K^e \nabla T_e \quad (A-4)$$

これをスカラー化したものがヒートフラックスである。つまり、各高度におけるヒートフラックスのグラフを観察することによって熱源の位置をより詳しく見ることが出来る。

ここで、式 (A-4) を用いてプラズマ圏内は熱伝導性がよく恒常的な熱源が存在しないという仮定から、同一磁力線内においてヒートフラックスが一定であるとしてある値を与えてやり、 ΔH 、 T_e 、 H_0 にもある値を与えてやれば、 ΔT_e が求まり、電子温度の高度プロファイルを描くことが出来る。したがって、TED観測データから作成した今回の電子温度の高度プロファイルから同一磁力線内におけるヒートフラックスの高度プロファイルを作成し、その値が全高度領域において一定の値を示していれば、エネルギーの流出入がないことになり、ヒートフローの式の有効性を示すことになる。

しかし、同一磁力線内のヒートフラックスが全高度領域で一定の値を示さない (例えばある高度でピークをもつ等) のであれば、熱伝導度の式をプラズマ圏内の値に対応して数値化させた

$$K_e = 7.2 \times 10^5 T_e^{2.5} \frac{1 + \log \left[\frac{h}{h_0} \right]}{1 + 1.5 \log \left[\frac{h}{h_0} \right]} \quad [\text{eV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (A-5)$$

という式において、何らかの外力の影響 (たとえばプラズマ波動など) で、一般的なプラズマ圏内の環境から変化したことにより、正しいプラズマ圏内熱伝導度を示せていないということや、そもそも仮定のうちの恒常的な熱源が存在しないというものを否定することなども考えられる。