

高度約 600 km におけるプラズマバブル  
近辺の電子温度について

小山孝一郎・竹村耕一\*・永井光浩\*  
渡部重十\*\*・高橋忠利\*\*・平尾邦雄\*\*\*  
大家 寛\*\*

(1987 年 5 月 10 受理)

Behavior of the electron temperature in the  
plasma bubble at the heights of  $\sim 600$  km

By

Koh-ichiro OYAMA, Koh-ichi TAKEMURA, Mitsuhiro NAGAI,  
Shigeto WATANABE, Tadatoshi TAKAHASHI, Kunio HIRAO,  
and Hiroshi OYA

**Abstract:** Electron temperature inside the plasma bubble was measured by means of Japan's 7th scientific satellite 'Hinotori' which was put into circular orbit of  $\sim 600$  km with the inclination of 31 degrees.

The behavior of electron temperature inside the plasma bubble is mainly studied in terms of local time and general features are summarized as follows.

Electron temperature inside the plasma bubble is 100 $\sim$ 200K lower than the ambient electron temperature at 20 $\sim$ 24 hours in local time and becomes equal to the ambient temperature after midnight. The electron temperature starts rising above the back

---

\* 武蔵工業大学

\*\* 東北大学理学部

\*\*\* 東海大学航空宇宙学科

ground temperature in the early morning, takes its maximum at 6~8 hours in the morning. Maximum deviation from the background temperature at this time was 2000K.

The electron temperature inside the bubble becomes equal to the ambient temperature as the plasma bubble decays. Some behaviors of the electron temperature differ from their general features.

### 概 要

第 7 号科学衛星“ひのとり”によって世界ではじめてプラズマバブル中の電子温度が測定された。測定された結果は系統的に整理された。結果は以下のように要約される。

真夜中前のプラズマバブル中の電子温度はまわりの電子温度より低く、朝方 3 時ごろにまわりの電子温度と等しくなる。この後朝方に向けてバブル中の電子温度は上昇し、午前 6 時ごろ最大となる。その後バブルの消滅と共にバブル内の電子温度も減少する。

このような一般的な傾向から離れて夜間に電子温度が上昇する事が南太平洋地磁気異常帯にみられる。ただし、その加熱の機構は明らかでない。夜間にバブル中の電子温度が上昇するのは何らかの熱入力のある存在がある事を示し、朝方の電子温度の上昇は磁気共役点からの光電子か、バブルの存在する高度より高い場所でできた光電子による加熱である。

### はじめに

1981 年 2 月 21 日に打ち上げられた軌道傾斜角  $31^\circ$  の第 7 号科学衛星‘ひのとり’は太陽の研究に供された衛星ではあるが、日本で独自に開発された二つの測定器、電子温度プローブとインピーダンスプローブが搭載されていた。

一見太陽面観測とは相入れないように思えたこの二つの観測器の搭載は結果的には二つの面で極めて重要であった。即ちその一つは過去に世界中でデータのなかった太陽活動度極大期における電子密度電子温度の世界的なモデルを作れる事、その二つは世界で初めてプラズマバブル中の電子温度を測定した事である。プラズマ不規則構造が存在しているプラズマバブル近辺の電子温度を測定する事は、従来のバイアス掃引型のラングミュアプローブでは殆んど不可能に近く、日本のユニークな電子温度プローブで初めて可能になったものである。

プラズマバブルは今までに主に電子密度に関して議論されてきた (Ossakow et al., 1977, Basu et al., 1981)。

### 1. センサー及びエレクトロニクス

図 1 に示した‘ひのとり’の 4 つの太陽電池パネルのうちの一つの先端に電子温度プローブのセンサーが、これと対向するバドルの先端に電子密度測定用のインピーダンスプローブが取付けられている。電子温度プローブセンサーは直径 120 mm, 厚さ 1.6 mm のプリント板の中心に円板の上に 2 個の半円が残るように円の中心から 10 mm 幅エッチングした後, 金メッキを施した。二つの半円と‘ひのとり’の衛星内部に格納された電子回路部とは 2 本の同軸ケーブルでつながれている。

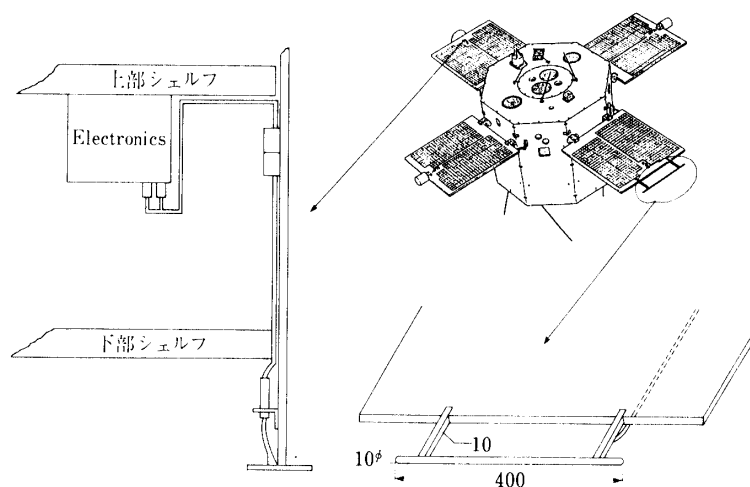


図 1 ‘ひのとり’の概観と電子密度及び温度プローブの取付け位置

第 2 表 電子温度プローブの電気的仕様

プローブ印加電圧	0 V, 0.5 Vp-p, 1 Vp-p
高周波周波数	30 kHz $\pm$ 5%
振幅安定度	1 V $\pm$ 4%以内
歪率	1%以下
DC アンプ利得	5.5
検出抵抗	1100 M $\Omega$
DC アンプ CMRR	>60 db

第 2 表 電子密度プローブの電気的仕様

プローブ印加周波数	0.2 MHz $\sim$ 10.24 MHz
印加レベル	0.1 Vrms $\pm$ 3 db
掃引周期	1.0 秒
観測容量値	1.0 PF $\sim$ 300 PF 10 PF $\sim$ 3000 PF
インピーダンス測定周波数	200 kHz, 400 kHz, UHR 周波数の 3 点

インピーダンスプローブのセンサーは直径 10 mm, 長さ 40 cm の円筒がパドルの先端から約 10 cm はなれてパドルの縁に沿っておかれた。

これら二つの測定器の詳細については既に報告されているので省略する (Oyama and Hirao, 1982, Oya et al., 1975)。

第一表に電子温度プローブの, 第二表にインピーダンスプローブの電氣的仕様を示す。

## 2. 得られたデータ

データは偶数フレームの  $W_{34}$ ,  $W_{98}$  および奇数フレームの  $W_{34}W_{98}$  を使ってまず電子温度センサーの一方の電極の浮動電位続いて周波数 30 kHz の高周波電圧 0.5 V, 0.25 V 及び 0 V を印加した時の浮動電位のずれを順次送り出す。一フレームの時間は一秒である。従って例えば浮動電位を検出した後次の浮動電位のサンプルまでは 2 秒を要する。衛星はスピンレートが約 16 秒なので, 往々にして出力される信号は衛星の作るウェークの内外の混ざったものであり, 図 2 に示されるようにスピンによる変調をうけている。図 2 に示されるように電子密度にスピンの影響が殆んど現われていない時があるが, この時にはデータを一部人力で解析したのち計算機処理した。通常はインピーダンスプローブが電子温度プローブと軸対称に取付けられている事を利用し, インピーダンスプローブの容量値が衛星の一スピンの間に最小を取る時, 即ちインピーダンスプローブがウェークの中にある時は電子温度プローブのセンサーがウェークの外にあるのでインピーダンスプローブの信号が最小になった時の電子温度プローブの信号をサンプルする事にした。このような考えに従ってデータ処理した地球一周の電子温度の振舞いの一例を図 3 に示す。朝 4 時ごろに電子温度は極小を示しその後急激に上昇し, 極大を示したのちゆるやかに減少して夕方に向けて減少する。朝方にデータのバラつきがみられるが, まだこの期間のデータ処理法に問題がある。

プラズマバブル中のデータ処理においても上記のようなデータ処理法に従って計算機処理したが, 特に電子密度プローブデータにスピンによる変調がある時でもバブル中のはげしい不規則構造のため, 計算機処理ができずに止むなく目で読み取らざるを得ない場合が多くあった。

本論文では 1981 年 6 月から 1982 年 2 月までの約 4000 周回分のデータ処理を行い, その中から 724 個のプラズマバブルを見出した。これらバブルの一つ一つに対してバブルの出現した場所及びその時の地方時およびバブルの出現した時の Kp インデックスを同時に計算機に入力した。

図 4 にはプラズマバブルを観測した衛星位置を地図上にプロットしたものである。図中点線は地磁気赤道であり, プラズマバブルは地磁気赤道付近に点在している事がわかる。東経  $90^\circ$  から  $180^\circ$  までバブルの個数が少ないのは内之浦上空でデータレコーダを再生するため, 内浦上空付近でのリアルタイムでの観測時間が少なくなる事によるものである。図 5 は検出したすべてのバブルの地方時に対する発生頻度である。この図において夜 23 時ごろにバブルの検出個数が最大になる事は過去に報告されているバブル発生の地方時依存性と同じである。図 5 には渡部, 大家(1986)によってまとめられたプラズマバブルの発生

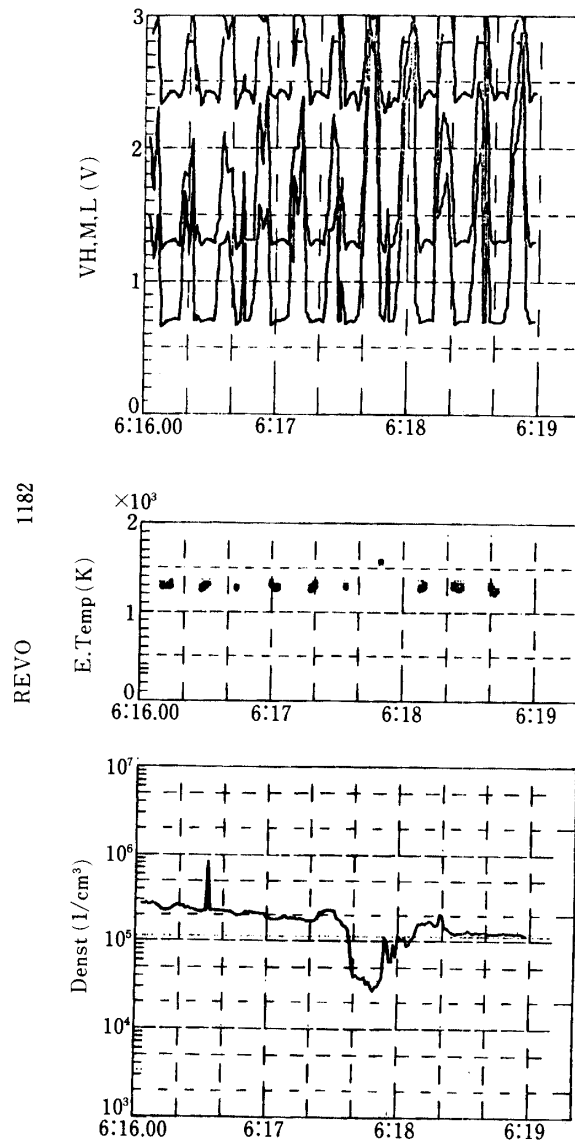


図2 周回数 1182 におけるプラズマバブル付近の電子温度，電子密度の出力波形の例

1. 一番上のパネル…高周波電圧 1V 0.5 V 及び 0 V ( $V_{P-P}$ ) を印加した時に生じる浮動電位のずれ。衛星の spin によって乱されている。
2. 二番目のパネル…一スピンに一回だけセンサーが衛星の作るウェークの外にあるので，これを利用して読み出した電子温度
3. 一番下のパネル…電子密度プロファイル

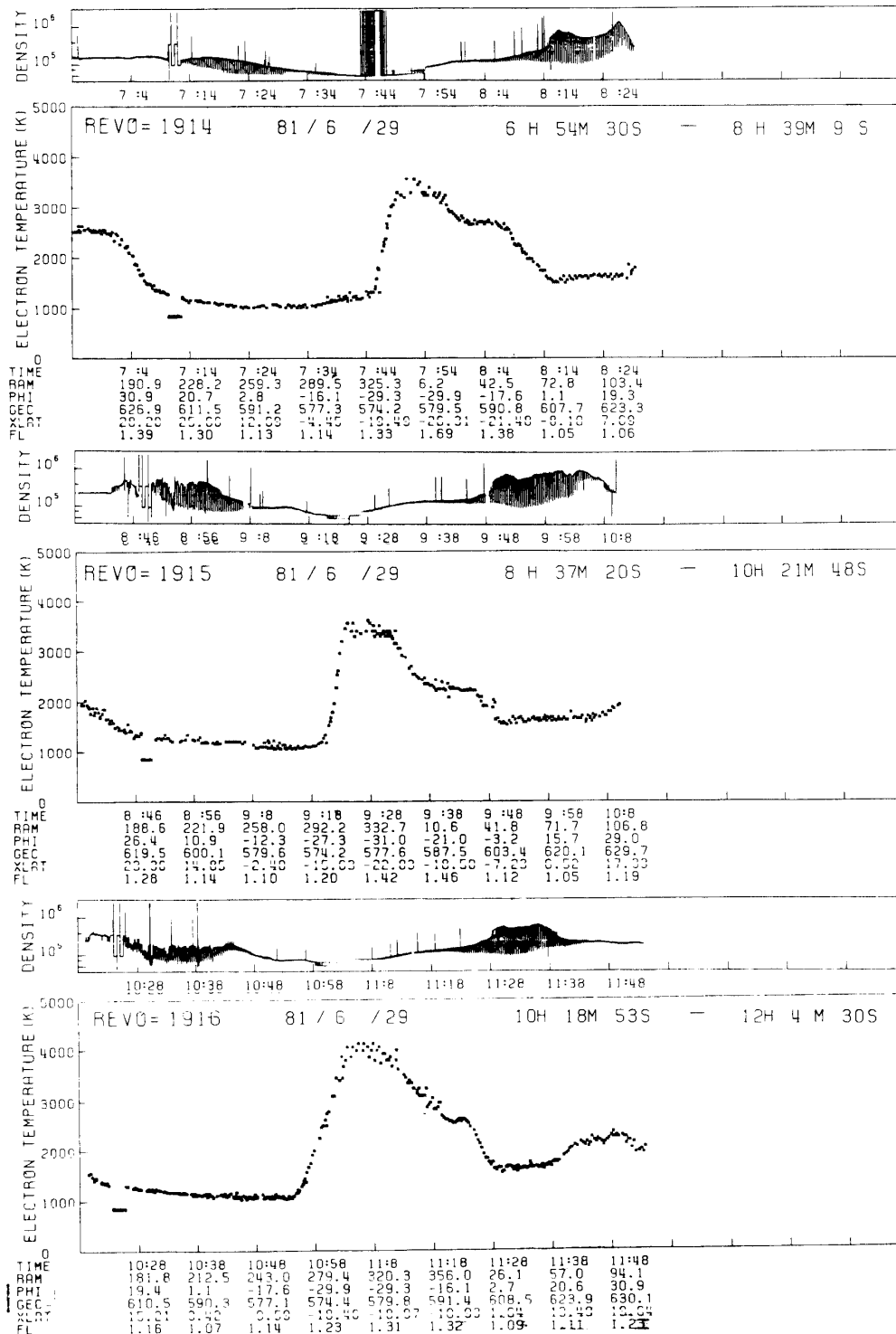


図3 ‘ひのとり’が地球を一周した時に得られた、電子密度(上部パネル)及び電子温度プロファイルの(下部パネル)例。連続周回数1914, 1915および1916。周回数1915の8時46分から8時56分の間, 周回数1916の10時28分から10時38分までの間にプラズマバブルがみえる。

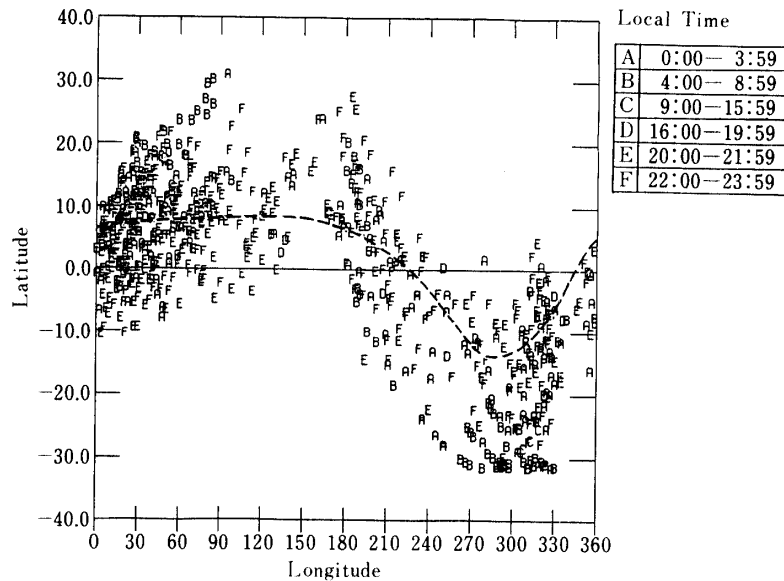


図4 ‘ひのとり’がバブルを検出した衛星高度での地球上での位置。点線は地磁気赤道、図中のABCDEの文字は図の右上に示した時間帯に測定したことを示している。

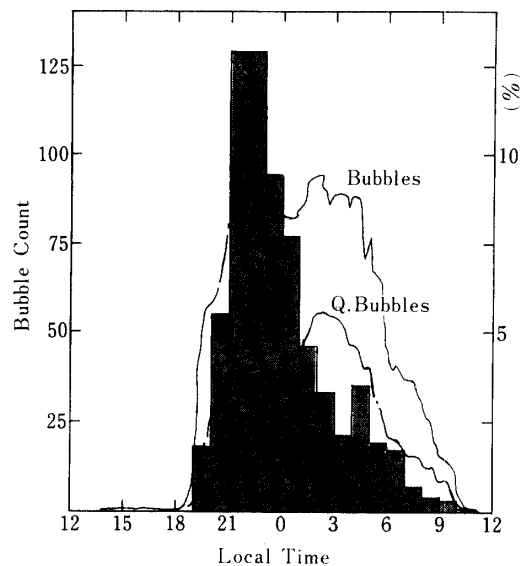


図5 プラズマバブルの地方時に対する発生個数。経度、緯度及び  $K_p$  インデックスに関係なくすべて含まれている。図中 Bubbles および Q・Bubbles と名付けられた二本の線は渡部、大家によるもので、夫々 Bubble 全体及び Quasi Periodic Bubbles の発生頻度を示す。これに対するスケールは右側の軸。

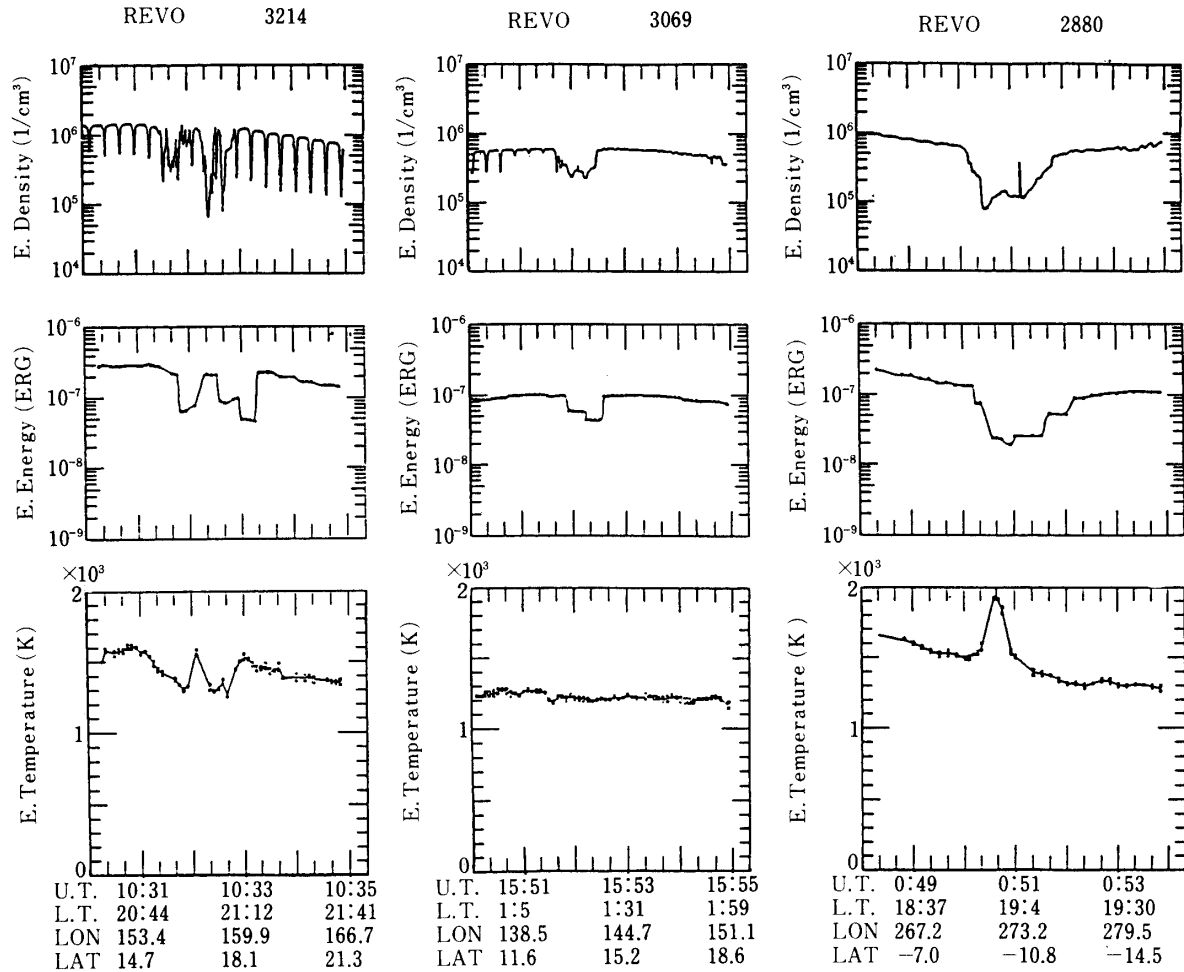


図6a プラズマバブル中の電子温度3様の第一例。左から周回数3214 (バブル中の電子温度低い場合), 3069 (変らない場合) 及び2880 (高くなる場合), パネルの上から電子密度, プラズマ圧 ( $=nkT_e$ ), 及び電子温度。一番下の数字U.T.は世界時L.T.は衛星高度での地方時, LON, LATはそれぞれ地理的経度, および緯度をあらわす。

頻度を同時に示した。夜21時ごろの発生頻度のピークはよく一致しているが午前3時ごろのピークは今回解析したデータでははっきりしない。

### 3. バブル中の電子温度の振舞い

図6はプラズマバブル近辺の電子温度の3種の振舞いを示したものである。プラズマバブル近辺の電子温度はすべてのバブルがこの三つの場合にわけられる。即ちバブル内の電子温度を  $T_{eb}$ , バブル外の電子温度を  $T_{ea}$  とすると, 三つの場合とは

1.  $T_{eb} < T_{ea}$  (バブル内の電子温度がバブル外の電子温度より低い)
2.  $T_{eb} > T_{ea}$  (バブル内の電子温度がバブル外のそれより高い)



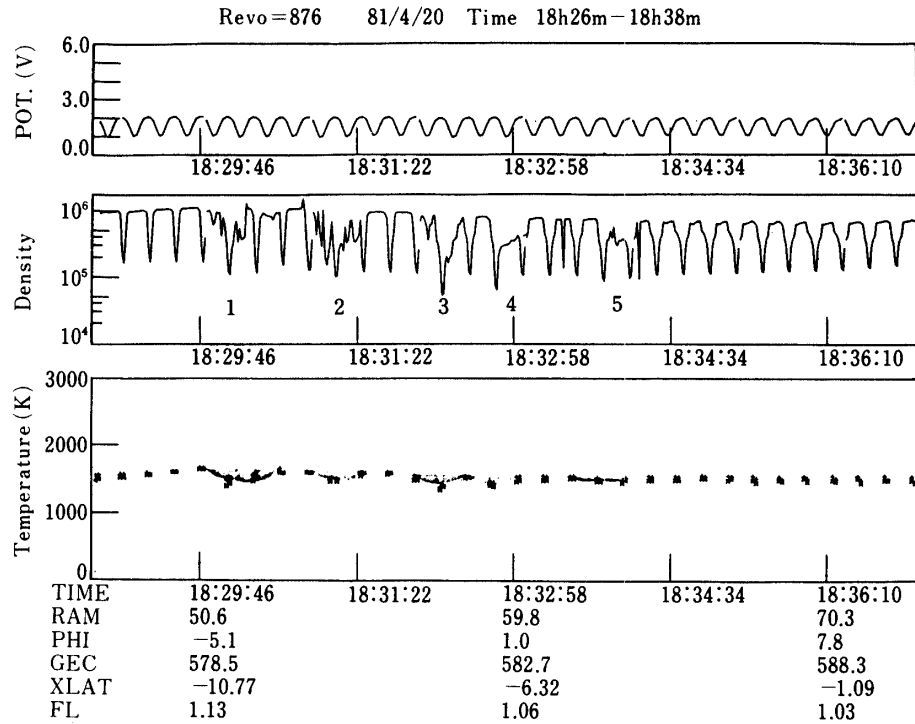
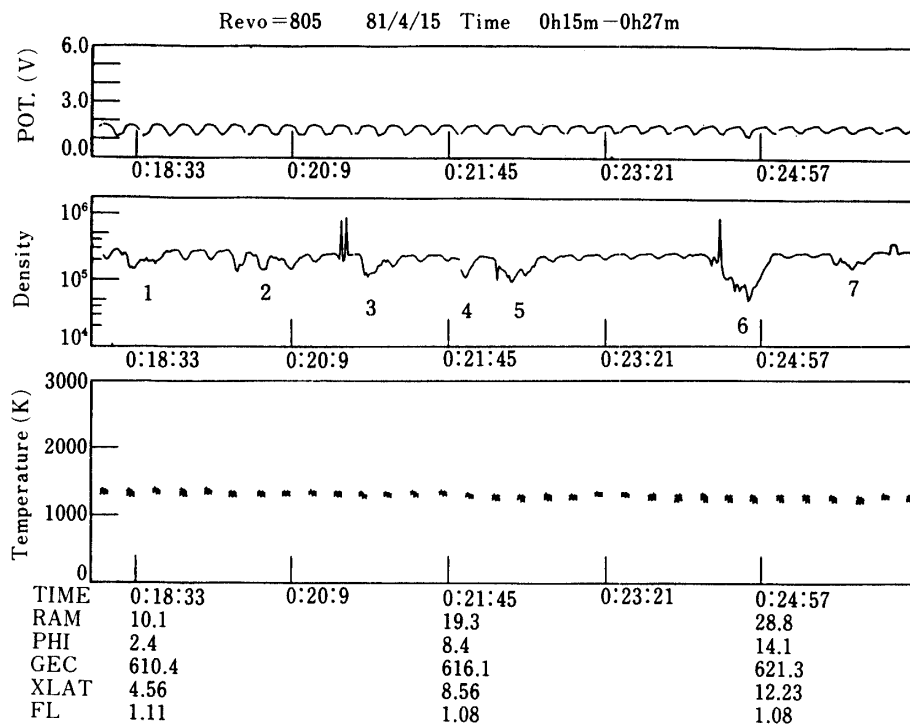
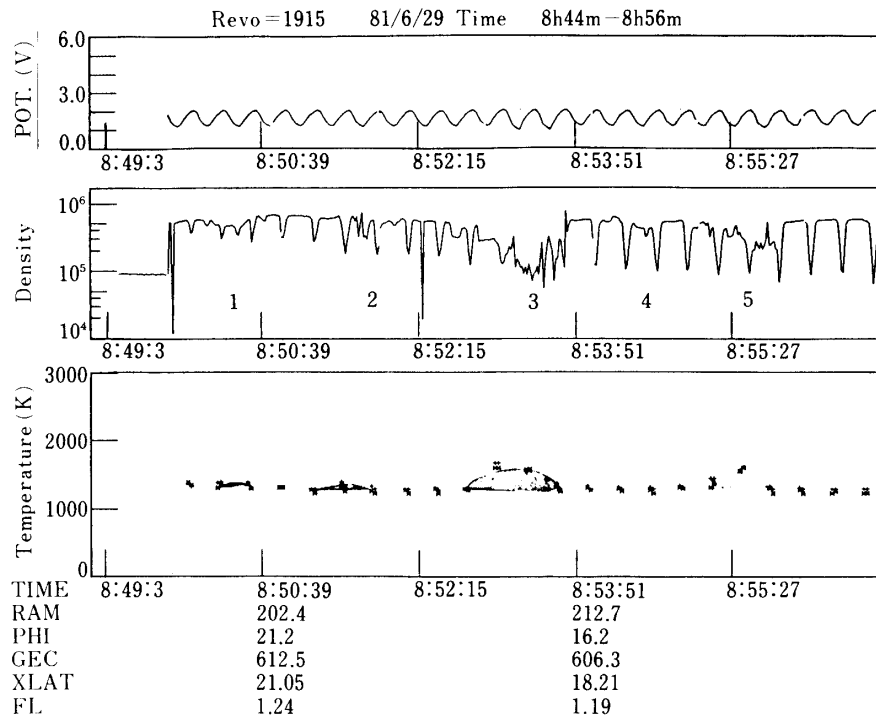


図 6 b プラズマバブル中の電子温度 3 様の第 2 例。

6 b・1 周回数 876 バブル中の電子温度が低い場合。



6 b・2 周回数 805 バブル中の電子温度が変わらない場合。



6b・3 周回数 1915 バブル中の電子温度が高くなる場合。  
 上から衛星電位(V), 電子密度(/cm<sup>3</sup>)及び電子温度(K)。一  
 番下の数字は TIME(世界標準時), RAM(地理的緯度),  
 GEC(高度), XLAT(地磁気緯度)及び FL(L value)である。

### 3. $T_{eb} \approx T_{ea}$ (バブルの内外で電子温度が等しい。)

である。周回数 3214 においてはバブル内の電子密度は  $10^5$ コ/cc でそれより約一桁少ない。この時バブル内の電子温度は約 1300 K で、まわりより 300 K 低い。周回数 2880 においてバブル内の電子密度は  $10^5$ els/cm<sup>3</sup> でまわりより約 1 桁少ない事は周回数 3214 と変わらないが電子温度は 2000 K でまわりより 500 K 高い。3 番目の例として周回数 3069 をあげると、この場合プラズマバブル内の電子密度は  $3 \times 10^5$ els/cm<sup>3</sup> でまわりの電子密度より約  $\frac{1}{2}$  低い。電子温度はバブル内外で等しい。注目すべきはプラズマ内部のプラズマ圧  $p = nk(T_e + T_i)$  は、バブル内の電子温度が高い時でも常に外部のプラズマ圧より小さい。ここではイオン温度  $T_i = 0$  とした。 $T_i$  がプラズマバブルの内外で大きくかわる事はないと思われるので  $T_e \approx T_i$  としても  $p$  はプラズマバブルの内外で 2 倍かわるのみでプラズマバブルのプラズマ圧  $p$  はプラズマバブルの外側より小さい事には変わらない。

#### 3.1 電子温度の地方時依存性

図 6 に示したプラズマバブル中の電子温度の多様性は一体どこから生じるのであろうか。これに対する答を見つけるのが、この節の役目である。図 6 a にみられたように Rev. 3069 の場合と Rev. 3214 では電子密度に差があるので、まわりの電子密度を横軸に、縦軸にまわりの電子温度とプラズマバブル内の電子温度との差をとると図 7 のようになる。こ

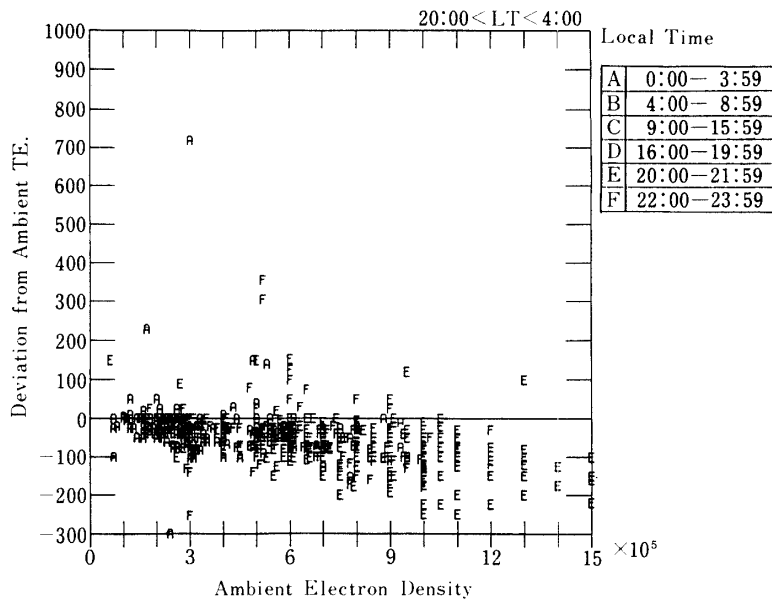


図 7 まわりの電子密度に対するプラズマバブル中の温度。  
右上の表は図中のデータが得られた時間域である。

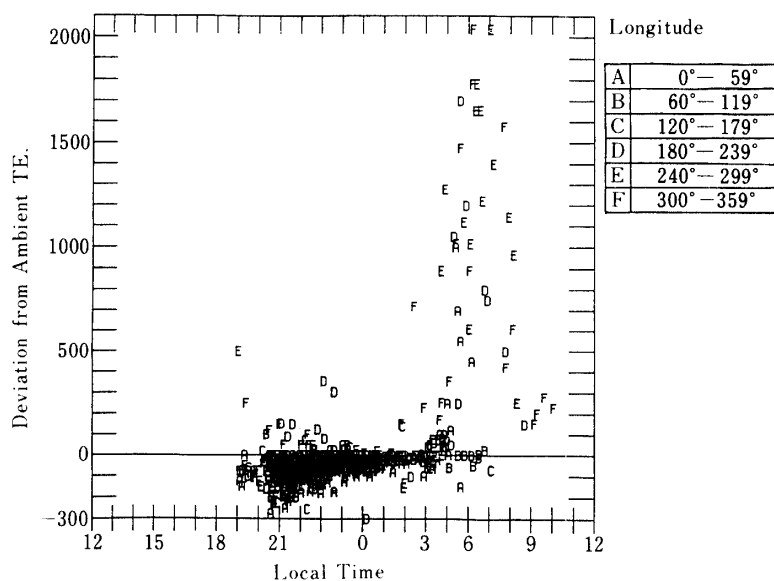
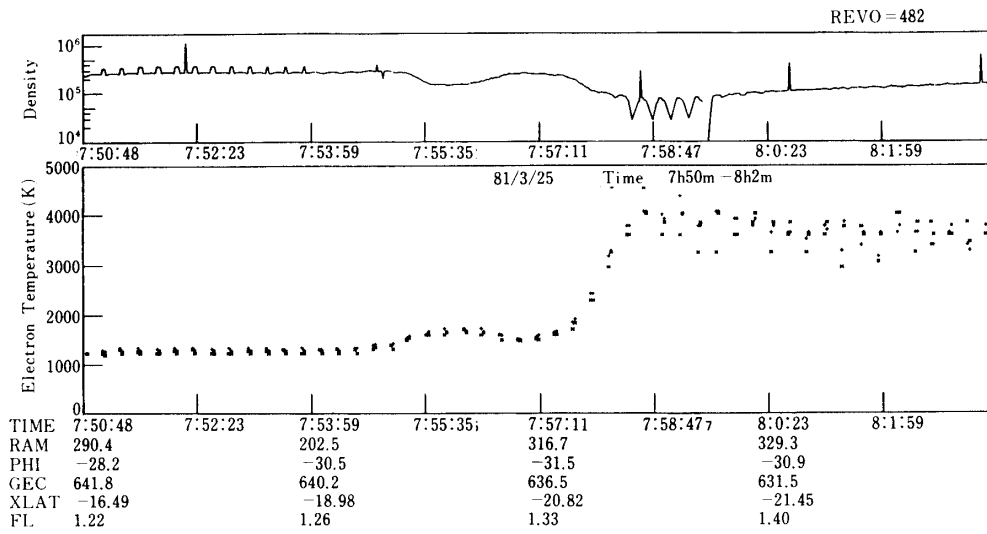
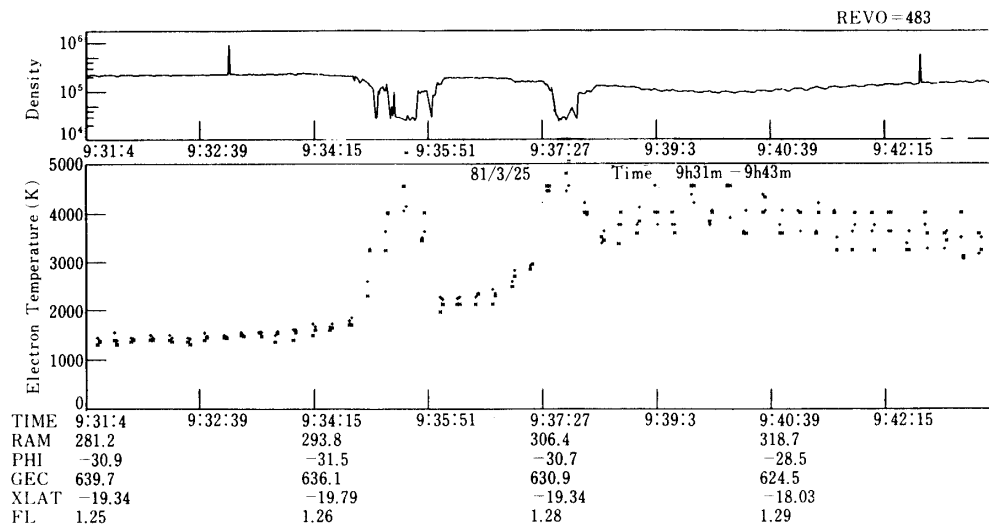


図 8 地方時に対するプラズマバブル内の温度。  
縦軸はバブル内の温度  $T_{eb}$  とまわりの温度  $T_{ea}$  との差。右上  
の表は図中のデータが得られた経度域である。

の図は電子密度が高くなるとバブル内の電子温度がまわりより低くなる傾向がある事を示している。図中 A～F はデータが得られた地方時であり、これをみると早朝には電子密度が低くかつバブル内の電子温度が上昇しているものが多い。地方時 20～24 時に得られたデータが多いが、この中でも周りの電子密度が高い程、バブル内の電子温度がまわりより低くなっている。



(a)



(b)

図9 プラズマバブル中の電子密度(上部パネル)電子温度(下部パネル)の刻々の変化。

図9a: 周回数 482 及び図9b: 周回数 483。

一番下の数字は図6bと同じである。

次に同じデータを使って横軸にプラズマバブルの得られた地方時、縦軸にプラズマバブル内外の温度差を図 8 のようにプロットすると、バブル内の電子温度に関する系統的な振舞いが明らかになる。即ち夕方には一部バブル内の電子温度が外側より高いのが見られるが、概してバブル内の電子温度はまわりより低い。真夜中に向かうにつれ、バブル内外の電子温度の差はなくなり朝方 3 時ごろからバブル内の電子温度は高くなり始める。朝 6 時ごろにバブル内の電子温度は最大をとった後しだいに減少しはじめる。

この図によってバブル内外の電子温度の一般的性質が明瞭になる。即ち夕方バブルの存在する場所を貫ぬく磁力線上にある共役点の電離層に太陽光があたっているか、あるいはバブルの存在している付近に太陽光があたっているとバブル内の電子温度は高くなり、完全に熱源がないと、バブル内の電子温度はまわりより低くなる。朝方にまわりより電子温度が高くなるのは夕方の場合と同じで、バブルの存在している場所を貫く磁力線上でバブルの真ぐ上が太陽光があたっているかあるいは共役点の電離層に太陽光があたっている場合である。朝 6 時ごろからのバブル内外の電子温度の差がなくなり始めるのはバブル自体が消滅の位相にある事によるものである。

### 3.2 朝方のバブルの振舞いについて

Rev. 482, 483 及び 484 は一連のプラズマバブルの進化を追っていると思われるがここでは Rev. 482 と 483 のみを示した。

周回数 482 において世界時 7 時 55 分 35 秒付近においては衛星高度での太陽天頂角は  $108.13^\circ$  であり、この高度への太陽光の入射は減衰されているだろう。また周回数 483 においては 9 時 35 分では太陽天頂角は  $99.90^\circ$  であり、プラズマバブル内の電子温度の上昇は、衛星高度より高い高度でできた熱いプラズマの流入によるものかもしれない。定量的な検討が必要である。周回数 484 においては既にまわりの電子温度も 2500 K となり完全に昼間における様相を示しており、まわりの電子密度はこの時  $2 \times 10^5$  コ/cc であり、従ってバブル内の電子密度は  $1 \times 10^5$  コ/cc とまわりの電子密度の約半分であり、すでにこの周囲のバ

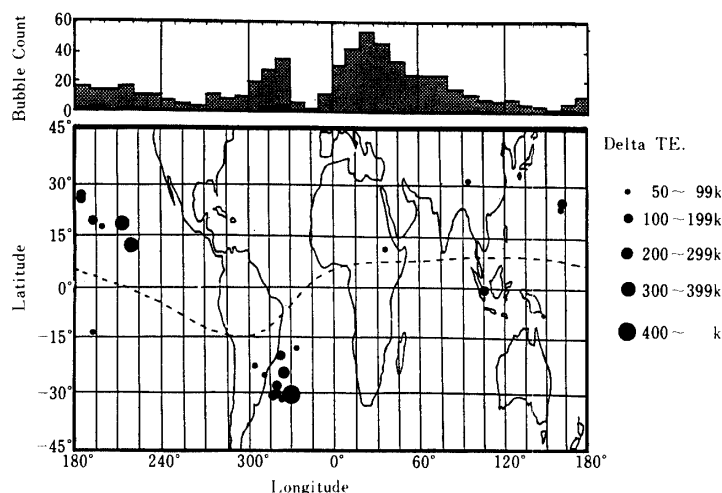


図 10 世界地図にマップしたプラズマバブル中の電子温度。点線は地磁気赤道。丸印の大きさはバブル内外の温度差を示す。

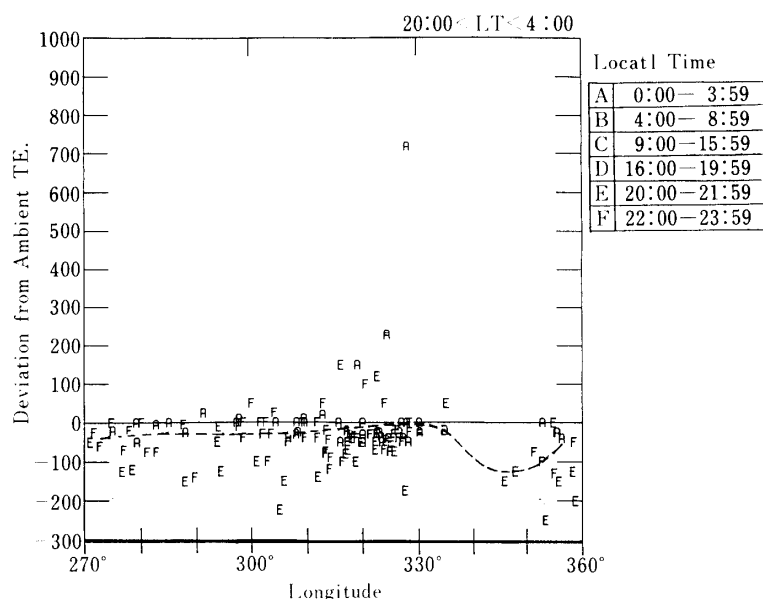


図 11 東経 270 度から 360 度の間で得られたプラズマバブルの電子温度差。縦軸は  $T_{eb}-T_{ea}$  でこの値が正であるという事はプラズマバブル内の電子温度がまわりより高い事を示す。

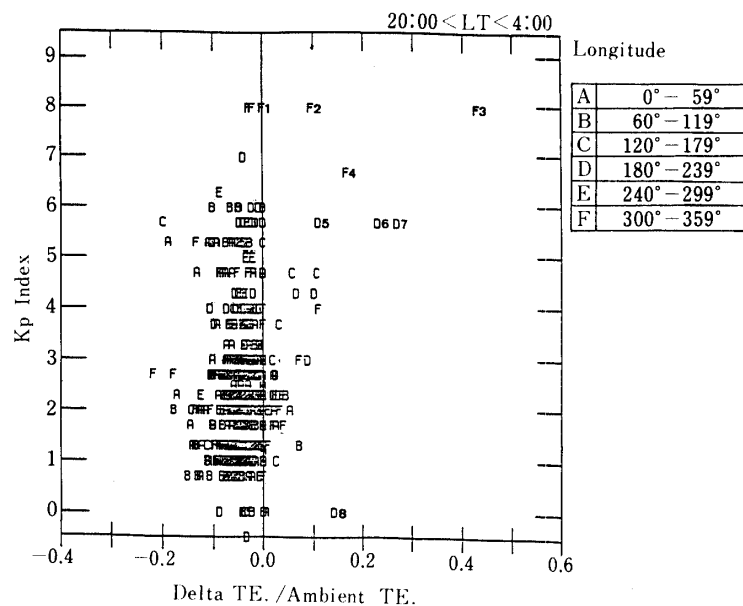
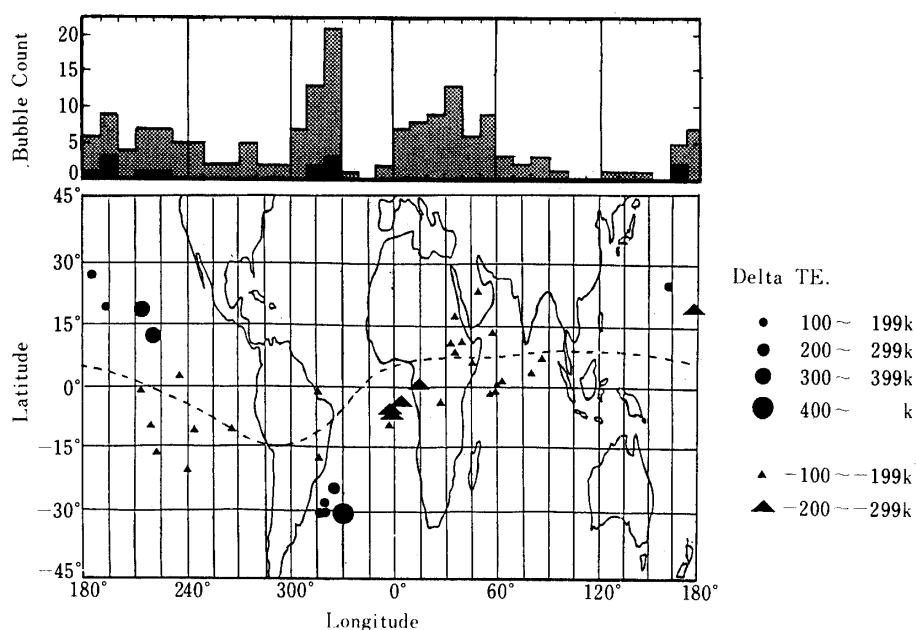
ブルは消滅状態にあると考える事ができる。

### 3.3 夜間における電子温度の加熱について

図 8 に示したようにバブル内の温度は一般的に、まわりのプラズマの電子温度より低いですが、たまにまわりのプラズマ温度より高い時がある。これがどうして引き起こされているのか調べるのがこの目的である。

図 10 にプラズマバブル内の電子温度がまわりより正になったケースを世界地図上にプロットした。図中一番上のパネルはバブルの個数でありそのうちハッチを施したヒストグラムは、バブル中の電子温度が正であるバブルのみを数えたものである。この図で明瞭な事はプラズマバブル中の電子温度がまわりにくらべて高いのは圧倒的に南太西洋地磁気異常帯であるといえる。東経  $0\sim60^\circ$  の間はバブルの検出数は最大であっても、バブル中の電子温度が正になるのはただ一例である。一方南太西洋地磁気異常帯でのプラズマバブルの観測個数は東経  $0\sim60^\circ$  の地域におけるより少ないが内部の電子温度が高いのはこの南太西洋である。

更に 270 度から 360° の地帯で得られたバブルの温度を縦軸に、横軸に経度を取ってデータをプロットすると図 11 のようになる。特に東経  $310\sim330$  度付近でプラズマバブル中の電子温度が高い。図中に見られるように、得られたデータを観測時間にわけてプロットすると東経 310 と 330 度の間で得られたデータは 20 時から 24 時にかけて得られたものが多く、この時間のプラズマバブル内の電子温度上昇には太陽光が関連していない事は明らかである。

図12 プラズマバブル中の電子温度の  $K_p$  インデックス依存性。図13 図10において  $K_p \geq 3$  の時のバブル内の電子温度をプロットしたもの。点線は地磁気赤道。

- 印はまわりに対してバブル内の電子温度が高い時。
- ▲印はまわりよりバブル内の電子温度が低い時。
- と▲印の大きさはバブル内外の温度差の大小をあらわす。

ではどのような地球物理条件でバブル内の電子温度が外側より高くなるのであろうか。

この事を調べるために横軸にバブル内外の電子温度の差をまわりの電子温度で割った値をとり、縦軸にバブルが観測された時の  $K_p$  インデックスをとってプロットすると図 12 のようになる。図中 A~F はバブルの検出された経度を  $60^\circ$  おきにわけて A は  $0^\circ\sim59^\circ$ , B は  $60^\circ\sim119^\circ$ , C は  $120^\circ\sim179^\circ$ , D は  $180^\circ\sim239^\circ$ , E は  $240^\circ\sim299^\circ$  及び F は  $300^\circ\sim360^\circ$  の経度範囲に存在したものである。 $K_p$  インデックスが大きい時にプラズマバブル内の電子温度が高くなるのは東経  $180^\circ\sim239^\circ$  にある D<sub>5</sub>, D<sub>6</sub>及び D<sub>7</sub> のデータで一方同じ  $K_p$  インデックスでも東経  $120^\circ\sim179^\circ$  で見出されたバブル C 内でまわりより電子温度が低い。明瞭ではないが東経  $300^\circ\sim350^\circ$  において得られたデータはだいたいの傾向として  $K_p$  インデックスの増加と共にまわりの電子温度より高い傾向がある。この傾向を更にはっきりさせるために  $K_p \geq 3$  の時に得られたバブルを地図上にプロットすると図 13 のようになる。一番上のパネルは  $K_p \geq 3$  の時に得られたバブルの個数で、強くぬりつぶしてあるのはこの中でもバブル中の電子温度が 50 K 以上まわりより高い場合の個数である。やはり目立つのはブラジル上空およびハワイ上空に近い場所でのプラズマバブル内の電子温度上昇である。即ちアフリカ上空  $0^\circ\sim60^\circ$  でのバブルの観測数は東経  $300^\circ\sim360^\circ$  に位置する南太平洋地磁気異常帯よりはるかに多いのにバブル内の電子温度が正になるのは南太平洋地磁気異常帯に集中している。

#### 4. 議 論

600 km 付近のプラズマバブルの電子温度の振舞いは以下のように要約される。真夜中前プラズマバブル中の電子温度は殆んどの場合まわりの電子温度より低い、磁場の擾乱時には特に南太平洋地磁気異常帯付近でまわりより高くなる。朝方 6 時ごろバブル中の電子温度は高くなる。

このような電子温度の振舞いはプラズマバブル近辺へのエネルギーの流入によってきまる。即ち 600 km 高度で他の熱入力もないと、F 層の底で発生したプラズマバブル中の温度は F 層中の温度を維持するかあるいはプラズマバブルの上昇中にまわりの電子温度と等しくなる。この事はバブルの電子温度が低い時に相当する。

もしバブルへの熱入力があるとその時の熱入力と熱損失の関係は

$$Q(=qN_e)=L_{ei}+L_{cond} \quad (1)$$

ここで  $L_{ei}$  はイオン電子の衝突による損失で  $L_{cond}$  はその場所への熱エネルギー入力あるいはその場所からのエネルギー流出を意味する。

$L_{ei}$  及び  $L_{cond}$  は下のような式であらわされる。

$$L_{ei}=4.7 \times 10^{-7} \times N_e^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2} \text{ eV/cm}^3 \cdot \text{sec} \quad (2)$$

$$L_{cond} = \frac{d}{dz} \left( K_e \sin^2 I \frac{dT_e}{dz} \right)$$

$$K_e = 7.7 \times 10^5 T_e^{5/2} \text{ eV/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{deg} \quad (2 \cdot 2)$$



$Q$  はその場所での熱的電子への熱エネルギー入力で  $q$  は一個当りの電子に与えられるエネルギーである。上記(1)の式を使ってプラズマバブル中の電子温度の上昇を説明できるかチェックしてみる。

このために図 6 b に示した周回数 1915 における 08 時 53 分のバブル 3 を例にとると、ここでは周囲の電子温度  $T_{ea}=1300\text{K}$ 、電子密度  $N_{ea}=5\times 10^5 \text{コ/cm}^3$  である。 $L_{cond}$  はバブルの外側では  $L_{eia}$  に較べて無視できるとすると

$$Q(=q_a N_{ea})=L_{eia} \quad (3)$$

であるのでバブルの外側における電子一個当りのエネルギー入力は

$$q_a=L_{eia}/N_{ea}=2.5\times 10^{-4} \text{ eV/sec}$$

ここで  $L_{eia}$  は  $T_{ia}=1250\text{K}$  として(2)式を用いて計算した。

一方 8 時 53 分 27 秒における  $N_{eb}=5\times 10^4 \text{ els/cm}^3$  及び  $T_e=1500\text{K}$  のバブル 3 の中の  $L_{eib}$  は(2)式により

$$L_{eib}=15 \text{ eV/cm}^3\cdot\text{sec} \quad (4)$$

である。ここでイオン温度はバブルの内外で変わらず  $T_{ib}=1250 \text{ K}$  であるとした。しかしこの仮定はバブルの発生したと思われる F 層下部と高度約 600 km におけるイオン温度が等しい事を意味し、現実的ではないが、本質的な議論には支障ないと考える。また  $10^5 \text{ els/cm}^3$  の電子密度を持つプラズマバブル内の  $Q_b$  は

$$Q_b=q_a N_{eb}=25 \text{ eV/cm}^3\cdot\text{sec} \quad (5)$$

であり式(4)と(5)を較べるとバブルの中では熱入力  $Q_b$  は  $25 \text{ eV/cm}^3\cdot\text{sec}$  であり、一方バブルの中でのイオンと電子との衝突による損失  $L_{eib}$  は(4)式により  $L_{eib}=15 \text{ eV/cm}^3\cdot\text{sec}$  で従って残りの  $10 \text{ eV/cm}^3\cdot\text{sec}$  が過剰のエネルギーとしてバブル内に存在する事になるがこのエネルギーは熱伝導  $L_{cond}$  としてプラズマバブル以外の場所へ逃げて行く事になる。

上記の議論はプラズマバブル中の電子温度の上昇は外部からのエネルギーの入力によって説明できる事を示している。一方バブルへのエネルギーの入力がなければ

$$Q_{eb}=L_{eib}=0$$

によって  $T_e=T_i$  となる。少しでもエネルギーの流入があるとバブルの中では  $T_e>T_i$  となる。この考え方をとるとプラズマバブルの中で電子温度がまわりより低いケースは F 層下部の低い電子温度及びイオン温度を維持している結果であるという事になる。

即ちこれを図示すると図 14 のようにあらわされる。即ち高度約 300 km で①のような電子密度をもったバブルがそのまま高度 600 km に上昇してきた時に高度 600 km 付近に熱入力がなければその時のバブル内の電子温度は①のように高度 600 km 付近での電子温度より低い。時間がたって電子密度が②のようであると、電子温度は高度 600 km のまわりの

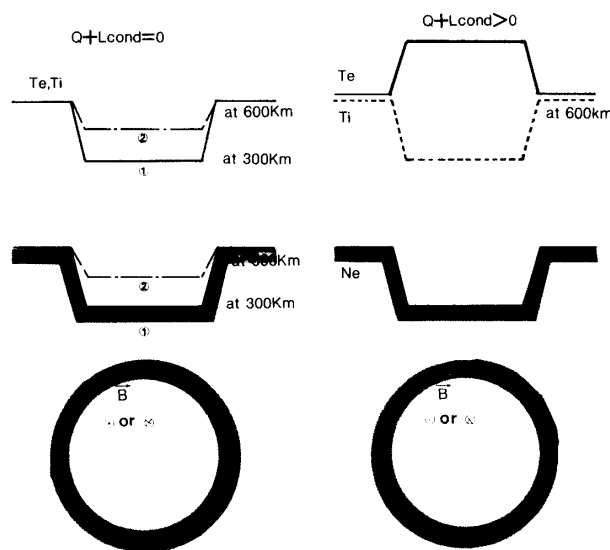


図 14 高度 600 km 付近でのプラズマバブル中の電子温度の振舞いについての基本的な考え方。

バブル内の電子温度がまわりより高いのはバブル近辺に何らかの熱エネルギー入力  $Q$  がある時である。 $N_e$  中の①と②の違いは②がより古いバブルと考える。

電子ガスよりエネルギーを得て少しずつあたためられ、電子温度のカーブ②のようになる。熱入力が 600 km 付近にあればこの時は電子密度の高低及び熱入力の大小によって電子温度は大なり小なりバブル内で高くなる。

ここでは  $T_{ia} = T_{ib}$  として議論したが、実際には最大高度 300 km におけるイオン温度と高度 600 km におけるイオン温度との差がある事になる。プラズマバブル中のイオン温度を測定する事によりより詳しいバブルの振舞いを知る事ができる。

### 謝 辞

プラズマバブル中の電子温度は第 7 号科学衛星‘ひのとり’によって得られた。この‘ひのとり’実験に直接、間接に関った多くの方々に深く謝意を表す。特に‘ひのとり’はいわゆる天文系の衛星として企画されたものであるにもかかわらず、電子温度プローブおよび電子密度プローブを搭載できるよう御骨折りいただいたマネジャー田中靖男教授に対して心からなる感謝の意を表するものである。

電子温度プローブの制作は松栄電子(株)によるものである。

### 参 考 文 献

Basu, S., and S. Basu, Equatorial scintillation-A review, J. Atmos. Terr. Phys., 43, 473-489, 1981

- Hanson, W. B., Electron temperatures in the upper atmosphere, *Space Res.*, 3, 282-302, 1963.
- Ossakow, S. L., S. T. Zalesak and B. E. McDonald, Nonlinear equatorial spread F., Dependence on altitudes of the peak and bottom side back ground density gradient scale length, *J. Geophys. Res.*, 84, 17-29, 1979.
- Oyama K. I. and K. Hirao, Electron temperature probe on board Japan's 7th scientific satellite 'Hinotori' Proc. 13th ISTS Symp. 1982.
- Oya, H. and A. Morioka, Instrumentation and Observations of Gyro-plasma probe installed on TAIYO for measurement of ionospheric plasma parameters and low energetic particle effects, *J. Geomag. Geoelectr.*, 27, 331-361, 1975.
- K. I. Oyama, K. Takemura, M. Nagai, S. Watanabe, T. Takahashi, K. Hirao and H. Oya, Behavior of the electron temperature in the plasma bubble at the heights of  $\approx 600$  km. ISAS, RN 307, 1986, also submitted to *J. Geophys. Res.*
- 小山孝一郎, 金子 透, 平尾邦雄, 奥沢 隆, 電波シンチレーションの発生頻度および空間スケールに関する統計的研究, 宇宙科学研究所報告特集号第 9 号, p. 27-44, 1984.
- K. I. Oyama, T. Abe and K. Hirao, Measurement of parallel and perpendicular electron temperatures in the ionosphere-explanation for the conflict of  $T_e$  measurements, ISAS RN322, 1986.
- Watanabe, S. and H. Oya, Occurrence characteristics of low latitude ionosphere irregularities observed by impedance probe on board the Hinotori satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, 125-149, 1986.