

室内実験から宇宙空間の実験へ —電離圏の DC プローブによる計測と最近の成果—

小 山 孝一郎*

Langmuir Probe Measurements in the Ionosphere and Recent Topics

by

Koh-ichiro Oyama*

Abstract: Dc Langmuir probe which was established by I. Langmuir in 1924 has been used to measure Te (electron temperature) and Ne (electron density) including plasma irregularities in the ionosphere since 1947 and its contribution to the ionospheric Physics is beyond our description.

We review the measurement of electron temperature/density in space, which have been conducted by means of Langmuir probe. We review the recent findings which have been obtained in Japan with Langmuir probes in Japan and list up the problems, which still remain unsolved.

Key words: Electron temperature, Electrode contamination, Insitu measurements, Ionosphere

概 要

1924年I. Langmuirによって理論的に確立されたDCプローブ (Langmuir and Mott-Smith, 1924) は地球を取り巻く電離圏における基本的な物理量である電子温度, 密度を測定するプローブとして, 第二次大戦直後米国がドイツから持ち帰った V-2 rocket に搭載されて以来 (Reifman and Dow, 1949), 多くの観測ロケット, 科学衛星に使用されてきており, 電離圏研究においてDCプローブは必要不可欠の観測器として, 極めて重要な役割を果たしてきた. 本稿はまず, 地球電離圏 E, F 領域, 電離圏上部および内部プラズマ圏における電子温度に関して世界の最先端を走ってきた日本が得た最近の成果を中心に概説する. 本稿の最後に電子温度, 密度に関する未解決の物理現象, 及び今後の測定に関する課題について記述する.

1. 序

地球大気は中低緯度においては主に太陽紫外線, 高緯度においては高速の荷電粒子により電離される. 図1には昼間の基本的な電離圏を示す. この図に示されていないが, 高度約 60–90 km の水クラスタイオン $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$ などの複雑な正負イオン, および電子, 中性ガスが混在する電離領域を D 領域, 90–160 km までの主に NO^+ , O_2^+ などの分子イオンの存在する E 領域, 160 km から約 300 km までの O^+ イオンが主成分となり磁力線方向のプラズマの拡散により電子密度が最大となる高度までを F 領域, 電子密度最大となる高度から上を Toppedside 領域と呼び, ヘリウム, 水素イオンが主成分である約 1000–2000 km から始まる高度を内部プラズマ圏と呼ぶ. それぞれの高度領域における中性ガス密度はたとえば夏, 日中, 太陽電波束 $F10.7 = 220$ (単位 $10^{-22} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$) の場合, 100 km において約 10^{12} 個/cc, 300 km で 10^9 個/cc, 1000

* JAXA/ISAS

本論文は Journal of Plasma and Fusion Research Vol.81. No.7 (2005), p482–525. に掲載された原稿を元に更に大幅に資料を加えたものである.

km で 10^6 個/cc である (Hedin, 1991). 図 1 に示した電離圏構造は中性大気が電離された場合の基礎的な構造であり, 実際には電離圏嵐, プラズマバブル, 赤道異常, スポラディック E 層, 中緯度トラフのように地球磁場の影響の下, 電場, 中性風によって大きく変化する. 最大電子密度となる高度から上の電子密度高度プロファイルは観測手法が限られていることもあり, 平均的な構造の検証すら困難である.

この章ではここに示されたような高度領域における DC プローブの応用について述べる.

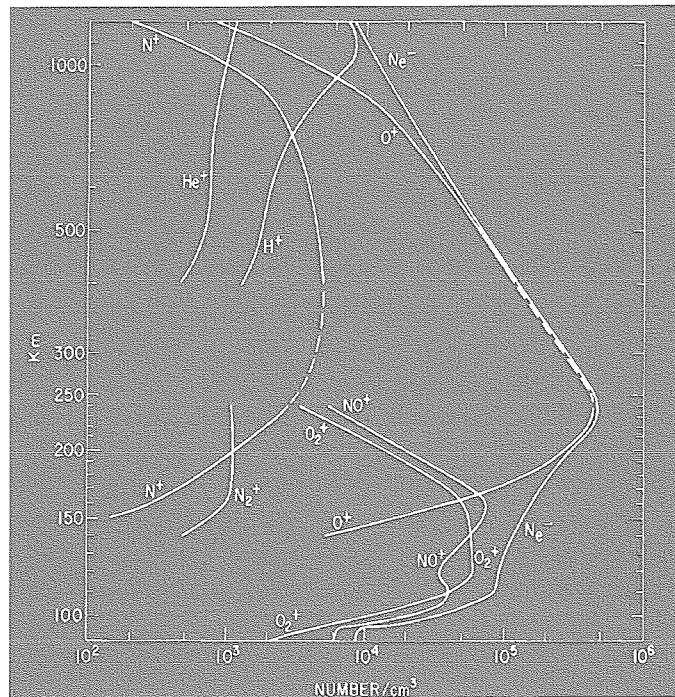


図 1 地球電離圏, 内部プラズマ圏におけるイオン組成, プラズマ密度高度分布.

2. 各高度領域における観測

2.1 D 領域における測定

D 領域では電子-中性粒子平均自由行程は数ミリメートルでシース厚さは数センチメートルである. 従って DC プローブのシース内に入ってきた電子はシースの中で中性ガスと衝突し, そのエネルギー分布はシースの外と異なり, DC プローブ理論における, 所謂衝突領域にある. 更に観測ロケットは毎秒約 1km で大気中を進行する. 従ってこの領域のプローブ理論はシース内の電子-中性分子衝突に加えて, DC プローブが高速で動く事によるプローブ前面の衝撃, 及びイオンがプローブ後方に回り込めないことによるシース形の変形を考慮しなければならず, その電子, イオンの捕集機構はきわめて複雑である. 従って現在でもプローブによる電子, イオン密度測定は相対値に留まらざるをえず, 実際にはプローブ電流を波動による電子密度測定法により校正するしかない. 過去において波動法が観測ロケットに搭載できない場合はこの校正表を使って DC プローブ電流から電子密度を計算した. しかしこのような方法は厳密に言えば正しくない (Oyama and Hirao, 1976a). DC 電流特性の電子加速領域の電流は負イオンと電子によるもので, 負イオンと電子密度の比は時間, 高度により異なる.

上記の影響より大きな問題は固定バイアス電流に及ぼす電極汚染の影響が電子密度によって大きく変化する事である (Oyama, 1976b). 電極汚染の影響は電子密度が高いほど深刻になる. すなわち電子密度が高いほど正しい値に対してプローブ電流が小さくなる. 図 2 は汚染電極と汚染を取り除いた電極による電子密度の高度プロファイルで, 汚染電極による電流を地上からの電離圏観測装置で得られた高度約 100 km での電子密度で規格化すると D 領域では汚染電極による電子密度は正しい値より高く見積もられる.

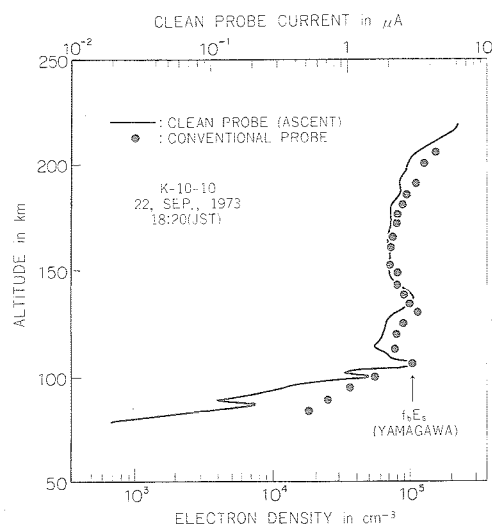


図2 汚染電極（丸印），および後述するガラス封入型プローブ（実線）により得られた電子密度の高度プロファイル．

絶対的な電子密度分布を与えるが，高度分解能はDCプローブに劣る波動法と絶対値は得られないが高度分解の優れた固定バイアスDCプローブ法は併用するのが望ましい．

2.2 E領域

電離圏E領域になり始めて無衝突プローブ理論が適用できる．しかし実際には電極汚染の問題は深刻である（Oyama, 1975）．Langmuirにより確立されたプローブ理論式は簡単であるので多くの人がこのプローブを使う．プローブを使う人は，表面をぴかぴかに磨き，アルコールやアセトンでふいて，表面を綺麗にしたと思いがちであるが，実際は水を主成分とする物質が表面から除去しきれない．ステンレス製の円筒電極の図3に示すようにプローブ電圧を掃印したときのプローブ電流は，プローブ電圧を増加させた時と減少させた時で異なり，いわゆるヒステリシスを描く．このような大きなヒステリシスは電極表面に付着した汚染物質による大きな容量によるものである．

電極の汚染の影響は周りの電子密度が高くなるほど大きくなる（之を筆者はヒステリシスの密度依存性と名付けた）．掃引電圧の周波数を高くすると電圧電流特性のヒステリシスは小さくなる（ヒステリシス周波数依存性）．

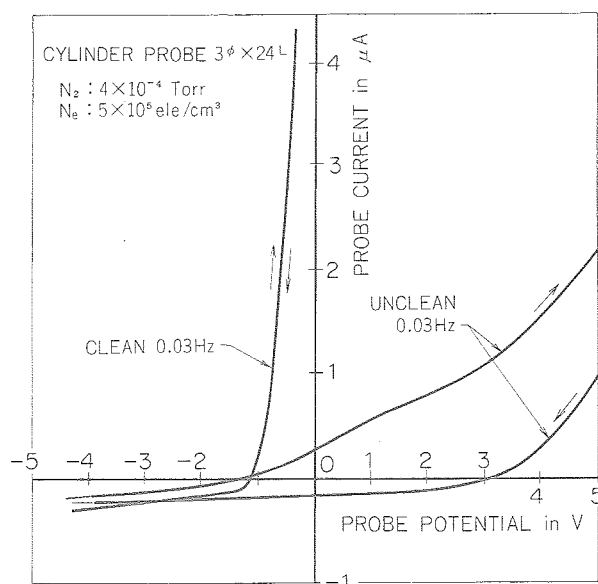


図3 汚染されたプローブ（unclean）と，後述するガラス管封入型プローブ（clean）による電流電圧特性．プローブ電圧の掃引周波数は0.03 Hz．

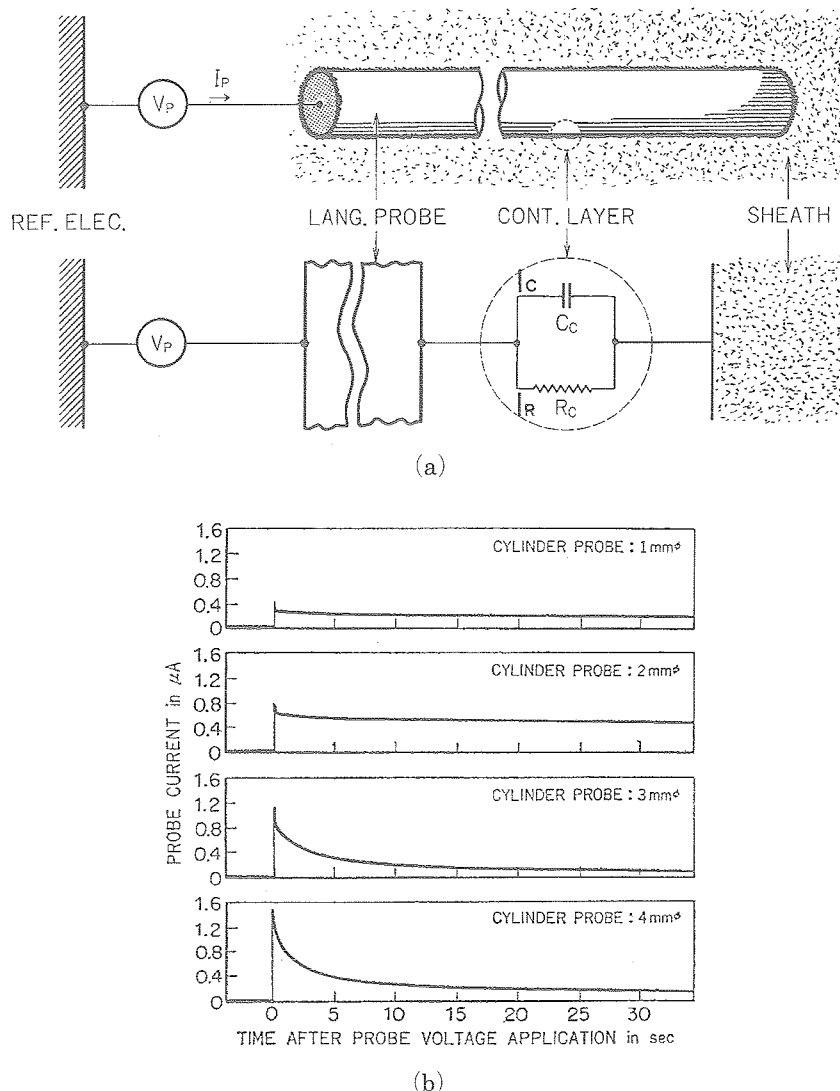
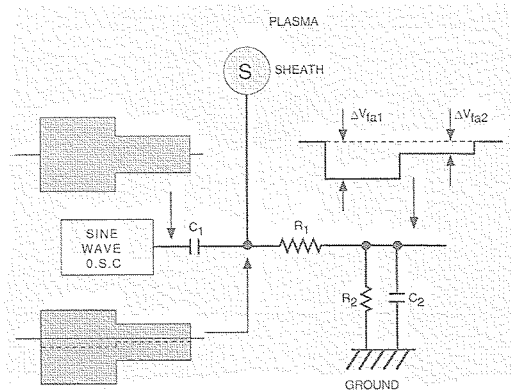
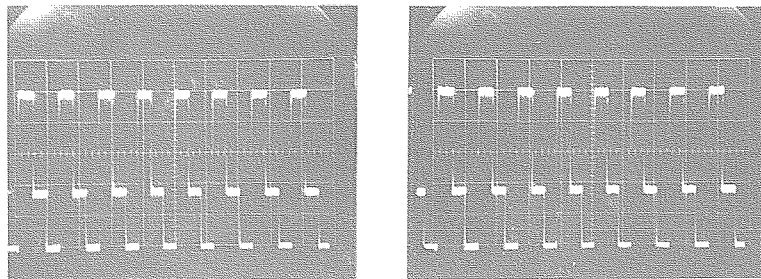


図4 汚染された電極の電気的な等価回路(a). ここでは基準電極側の汚染は示していない. C_c および R_c は電極表面に付着した汚染物質による容量と抵抗である. 図4bはステップ状の電圧を直径1, 2, 3, 及び4ミリメートルの電極に印加した時に電極に流れる電流の波形. 図4bは図4aに示された等価回路の正当性を支持する.

このような電圧電流特性に現れるヒステリシスは電極表面が汚染されている事による仕事関数の時間変化によるものではなく、図4に示すように電極表面に付着した汚染物質が大きな抵抗と容量を形成する事によると考えるべきである. 宇宙における観測の場合、基準電極は観測ロケット本体、あるいは衛星本体であるが、これらの表面における汚染物質による容量はプローブ表面の容量に比べ極めて大きく、従って其の抵抗は考慮する必要はない. この図から理解できるように電極汚染の影響を取り除くには、汚染成分の容量による抵抗 $Z_c (= (2\pi f C_c)^{-1})$, f はプローブ掃引電圧の繰り返し周波数) の影響を取り除く測定回路を考案するか、あるいは電極汚染そのものを除去する方法を考え出すかである. 前者の第一の方法は汚染電極のプローブ電圧を高速掃引する事で、私達は室内実験でNOと水の混合ガスに紫外線を照射する電離圏D領域の化学反応に関する実験で用いている (Sinha et al., 2003; 川口他, 2005). 前者の考え方に基ずく第二の方法はプローブに高周波を印加した時に生じる浮動電位のずれから電子温度を測定するもので電子温度プローブ (Electron Temperature Probe) と名付けた (Hirao and Oyama, 1970). 図5にその原理と測定回路のブロックダイアグラムを示す.



(a)



(b)

図5 (a)電子温度プローブのブロックダイアグラムと (b) 電子温度プローブの出力波形；汚染した電極（左）と汚染していない電極（右）。横軸は時間（0.5秒/div），縦軸は負小津電位のシフト分を増幅した電子温度プローブの出力電圧（0.5 V/div）。

電極は直径 10 cm の半円状の二枚の電極で、電極の浮動電位で重畳する高周波電圧は周波数 30 KHz, 振幅 400 mV, 200 mV, 0 V でそれぞれの電圧の印加時間は 200 msec である。電子温度プローブは日本だけでなくカナダ, 米国, ブラジル, 韓国, インド, 西ドイツとの共同実験に用いられてきた。西ドイツとの共同実験では電子温度プローブとヨーロッパの IS レーダで得られた電子温度との比較もなされ、きれいな一致を見た。また日本で行われた西ドイツとの観測ロケット共同実験で得られたレゾナンスコーンプローブ (Piel et al., 1988; Rohde et al., 1993) と電子温度プローブによる電子温度も一致しており、測定器の優秀性は世界的に認知されている (図6)。

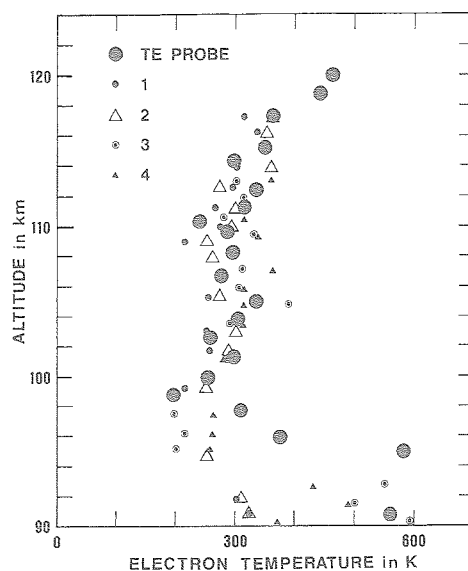


図6 電子温度プローブ (TE PROBE) とレゾナンスコーンプローブによる比較。レゾナンスコーンプローブによる4種のデータは2対の計4本のアンテナを交互に電波の送受信に用いて、その信頼性を検証するために得たものである。

電極表面の汚染そのものを除去する方法は図7に示したようなガラス管封入型プローブとして実現された (Oyama and Hirao, 1976). 直径3ミリメートル, 長さ約27センチメートルのステンレス電極を直径10ミリメートルのガラス管に封入しこれを約 10^{-5} パスカル以下の圧力のもと約200度Cで3日以上連続で排気した後, ガラス管の先端をガスバーナでチップオフする. 観測ロケットに搭載されたガラス管封入型プローブは観測ロケットが電離圏計測領域に突入した時点でガラス管の根元を破壊する. ガラス管破壊後, プローブがロケットスピン軸に垂直に展開されると, ガラス管のみがスピンによる遠心力で飛ばされる.

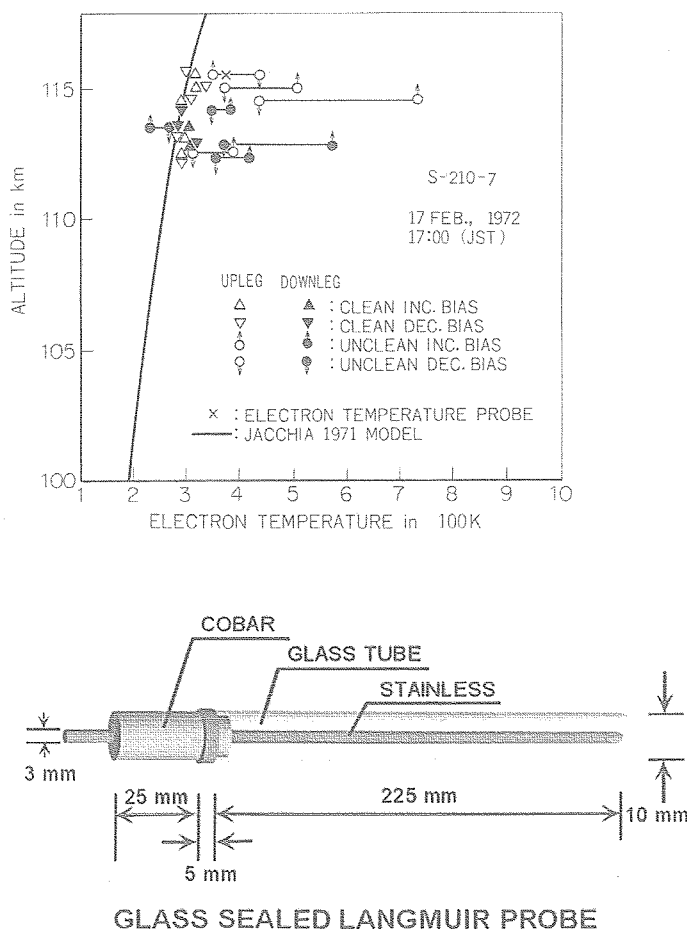


図7 ガラス管封入型プローブとロケットに搭載されたガラス封じプローブにより得られた電子温度.

このガラス管封入型プローブはDC電圧電流特性を取得すると同時にエネルギー分布を測定するために, Druyvesteinの原理 (Druyvestein, 1930) にもとずいて考案された2次高調波法に使用されている. Druyvesteynによれば, 電子のエネルギー分布 $F(eV)$ は以下のように記述される.

$$F(eV) = C V^{1/2} d^2 i / dV^2$$

ここで V はDCプローブでの空間電位からの電位, C は定数, $d^2 i / dV^2$ はDC Langmuir電圧電流特性の二次微分である. DCプローブ特性の二次微分はプローブ掃引電圧に高周波電圧 (周波数 f , 振幅 a) を重畳した時のプローブ電流からその二次高調波成分 i_{2f} を検出すれば実現できる. すなわち i_{2f} とDC電流電圧特性の二次微分は

$$i_{2f} \doteq a^2 / 4 \cdot (d^2 i / dV^2)$$

と表わされる. 実際の観測ロケットでの掃引電圧の振幅と周波数はそれぞれ0-2.5V, 1-2Hzの三角波で, 高周波電圧の振幅 a と周波数はそれぞれ70mV, 1KHzである. 交流増幅器の総合利得は80dbが限界で従ってこれ以上の利得を要する夜間電離圏の観測は不可能である. 下記に紹介する結果は観測ロケット, 科学衛星により電子温度プローブ, 及びガラス管封入型プローブにより得られたものである.

3. 得られた成果

3.1 観測ロケット

多くの観測ロケットに搭載された電子温度プローブにより蓄積されたデータから見出された最も奇妙な現象は、図8に示すように著者等が“Sq Focus Anomaly, (Sq 中心異常)”と名付けたものである。高度 105 km 付近の Sq 電流の中心付近に 1, 2 月に限って電子温度の異常な上昇が発見された (Oyama and Hirao, 1979a; Oyama et al., 2000)。そのような高い電子温度層の中では図9に示すように電子がマクスウェル分布状態にない事が見出された (Oyama and Hirao, 1979a; Oyama and Hirao, 1979b)。

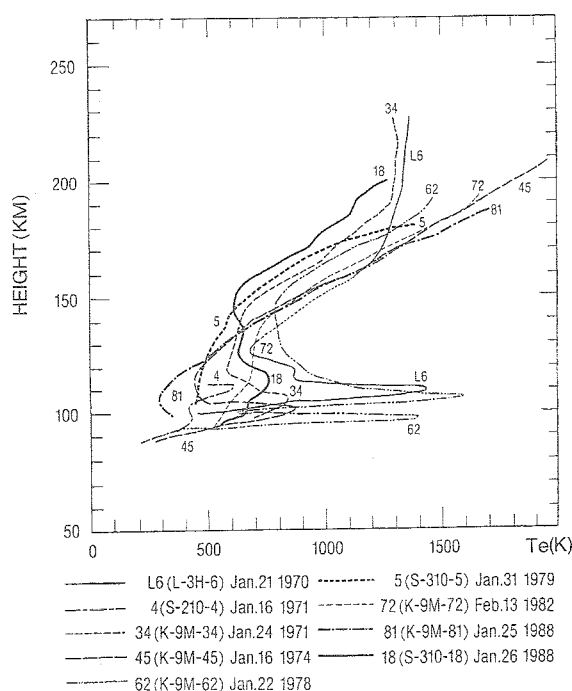
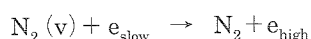


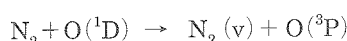
図8 高度 105 km 付近に出現する高い電子温度層のまとめ。

高い電子温度の層の電子温度は太陽黒点の増加とともに、かつ観測点が Sq 電流の中心に近いほど高くなり、中心から、緯度 5 度離れるとほぼ中性ガス温度に等しくなる。このことはこの現象が日本標準時 11 時を中心にしてプラスマイナス 20 分というきわめて狭い時間帯に現れることを示唆していると思われる。高い電子温度発生時に観測ロケットで大きなプラズマ密度変動が検出された。Sq 電流に伴うこれら一連のこの現象は未だ説明されておらず (Oyama, 2000), 2005 年冬期に本現象の解明のための観測ロケット実験が予定されている。

高度 100 km 付近の電子温度は中性ガス温度に等しい筈であるにもかかわらず、測定された電子温度は高い (Oyama and Hirao, 1980)。この問題はプローブ観測が始まって以来の大きな問題で多くの研究者が議論してきたが結論に達することができなかった。我々はこれに関して多くの室内実験を繰り返した (小田, 2001; 下山他, 2004)。これらから得た結論は、電極汚染を除去しても中性ガス温度より尚高い電子温度は真実であり、高度 100 km 付近には電子温度を中性ガス温度より高める熱源が存在するか、あるいは過去における電子温度の計算に用いられたパラメータが不適当であるかのいずれかによるものと確信するに至った。熱源の候補の一つは励起された窒素分子 $N_2(v)$ による電子の加熱 (Paniccia, 1986) である。即ち、



上の式において e_{slow} は振動励起された窒素分子からエネルギーを得る前の熱的電子で、 e_{high} はエネルギーを得た後の電子である。窒素を振動励起するのは高度 100 km 付近においては以下の反応が主である。



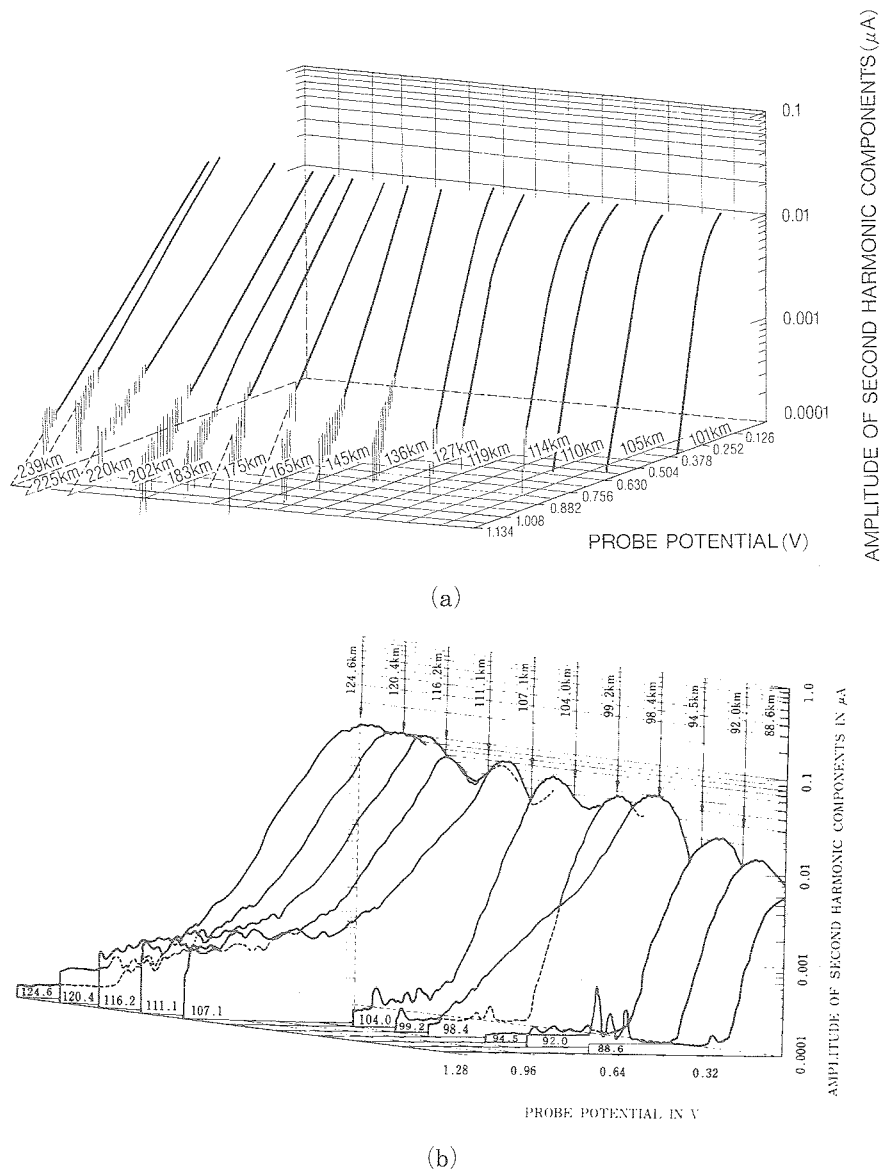


図9 高電子温度層が現れていない時の熱電子のエネルギー分布 (a) と高電子温度層中の熱電子エネルギー分布 (b). 横軸は周りのプラズマの空間電位を基準にしたプローブ電位で、縦軸は2次高調波成分の振幅を検波し、電子回路で対数変換した値. 片対数プロットの直線性は熱電子がマクスウェル分布状態にある事を意味する.

光電子の一部が窒素分子の振動励起に使われている事は観測ロケットによる電子のエネルギー分布測定から確認されている. 即ち窒素分子は光電子により振動励起され、一方では熱電子を加熱するという面白い役割を演じる.

著者らは上記の様な振動励起窒素分子による熱的電子の加熱を検証するためにはまず窒素振動温度を観測する必要があると考え、之まで3回の観測ロケット実験を行った (川島他, 1997; Kawashima et al., 1999). 観測された振動温度は電子温度に極めて近いことを考えると振動励起された窒素による加熱は尤もらしい (Oyama and Hirao, 1985; Kurihara et al., 2003). しかしながら理論は測定された電子温度を説明する事に成功しておらず、更なる研究が必要である (Pavlov, 1994). 窒素振動に関するエネルギー過程は内部プラズマ圏の熱エネルギーの理論計算にも考慮されるようになった (Pavlov et al., 2001).

夜間の電子温度測定は中性ガス温度より高い昼間の電子温度を説明するヒントをあたえると思われるが、高速で飛翔する観測ロケットにおいて、プローブ電圧を高速掃引しなければならず、微小電流を増幅するためのDCアンプの周波数特性が十分でなく、現時点では不可能であり、過去にこの高度領域の夜間の信頼できる電子温度データは存在しない. この困難を克服する測定法については後述する.

3.2 衛星観測

3.2.1 電離圏上部における観測

電子温度プローブは之まで日本の5機の地球周回衛星 (Oyama, 1991) と火星探査機 “のぞみ” に搭載されてきた。この原理を用いたプローブは旧ソ連の衛星に搭載され、最近では韓国衛星に搭載されている。ブラジルの初めての小型衛星に搭載されたが残念ながら衛星自体が作動しなかった。次期ブラジル小型衛星にも搭載される予定である。

日本の太陽観測衛星 “ひのとり” (1981年2月に打ち上げられ、1982年6月まで軌道傾斜角31度、高度600 kmの円軌道にあった) に搭載された電子温度プローブは日本でもっとも確立された観測器の一つである ‘インピーダンスプローブ’ と呼ばれる電子密度測定器と共に多くの成果をだした。まず一番大きな成果のひとつは赤道帯に現れるプラズマバブル内の電子温度を測定した事である (Oyama et al., 1988)。プラズマ密度が時間的に、空間的に大きく変動するプラズマバブル内でDCプローブによる電圧-電流特性から電子温度を得るには多くのデータ伝送量を要するので現在でも私たちの測定結果を超える成果は外国では報告されていない。

図10aには電子温度プローブによる高度600 kmでの経度210–285度における電子温度を春分、秋分、北半球の夏、および冬の3期間に分けて示した。図10bには経度280–360度における電子温度を示した。経度による微妙な電子温度の違いは地磁気子午面がアジア域では、東に、アメリカ域では西に傾いているため、東西風、あるいは南北風が磁力線にそってイオンを押し下げたり、押し上げたりする事により生じる電子密度の違いで説明できる (Oyama et al., 1996; Watanabe and Oyama, 1996)。

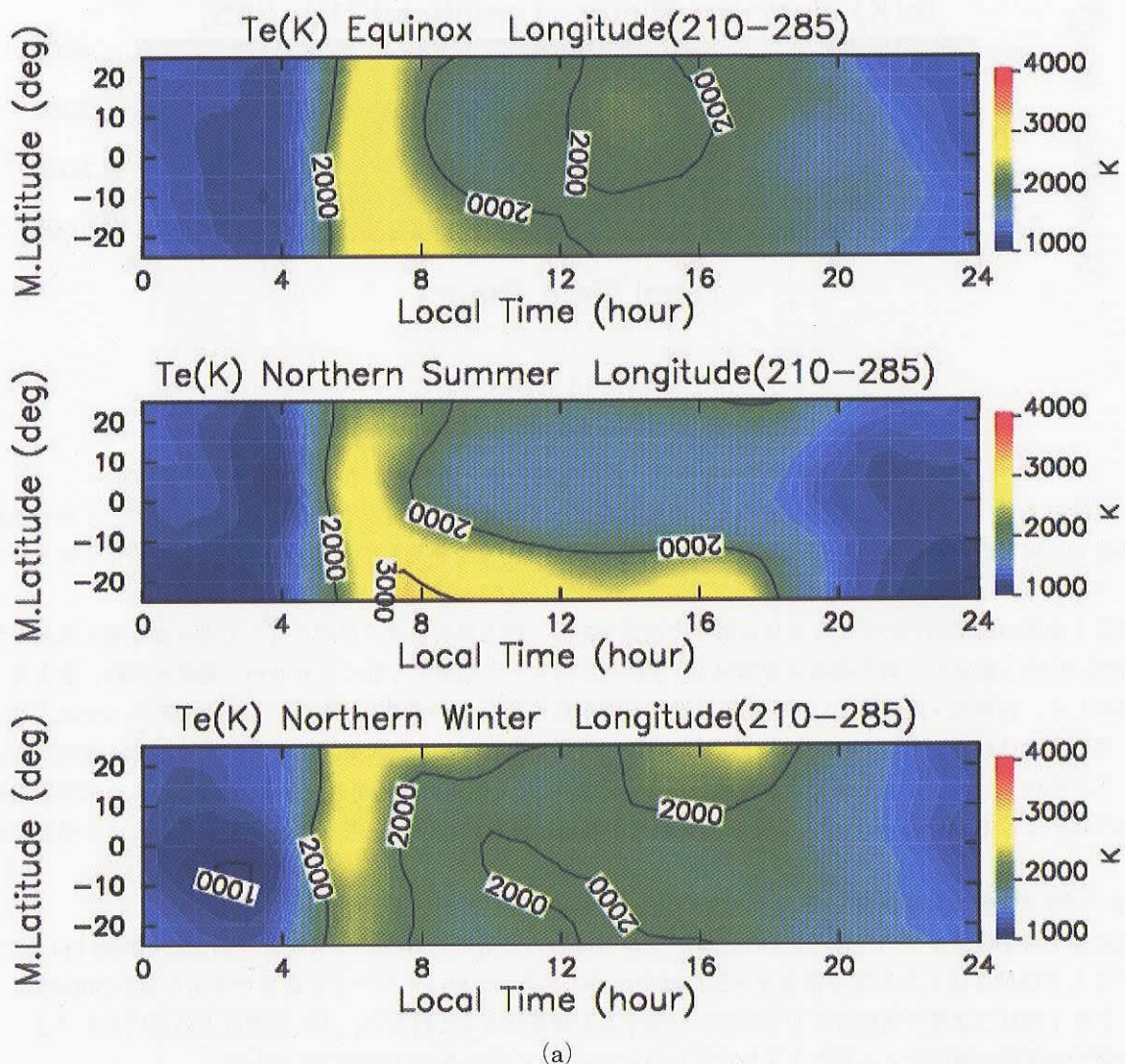
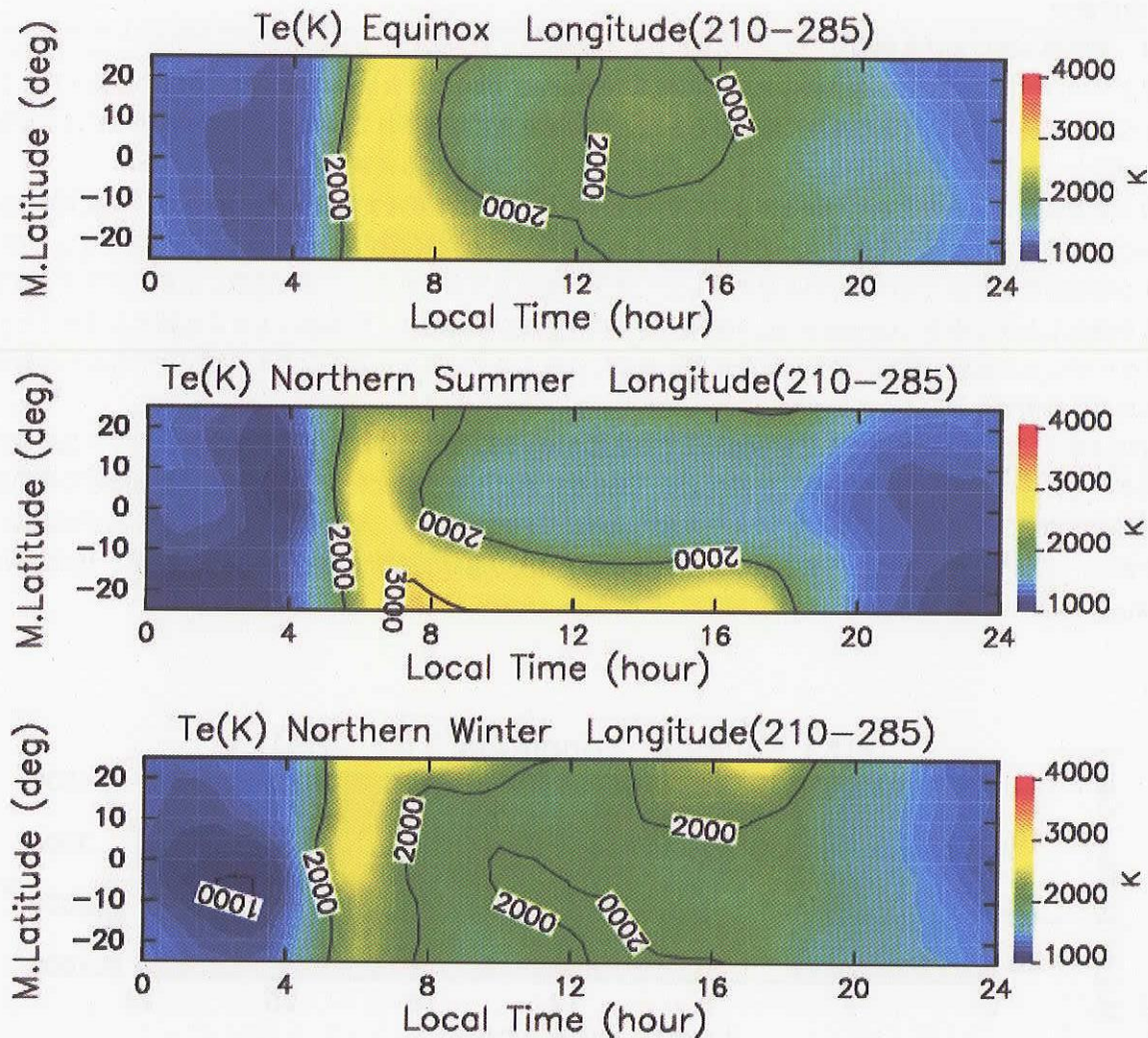


図10 高度600 kmにおける経度185–280度 (a) および285–360度 (b) における電子温度の季節変化。



(b)

図10 続き

図10に示された平均的な電子温度を熱圏の中性風、及び電場の値を調整する事により計算機シミュレーションで再現することは可能であり、このことは電子温度のような簡単なプラズマ基礎量を測定するだけで、熱圏における中性風風系の算出の可能性を示唆している (Su et al., 1996, 1997). 得られたデータを整理して高度 600 km における電子温度の平均的なモデルを作った (Oyama et al., 2004).

電離圏電子温度は電離圏のわずかな変化に極めて敏感である。最近筆者らは‘ひのとり’で得られた電子温度と地震との関係を詳細に検討し始めた。電子温度は地震発生1週間ほど前から平均値より低くなり始め、地震発生時に最もモデルからのずれが激しく、地震後1週間ほどして平均値に近づく例が見られた。すべての地震に対して上記のことが見られるわけではなく、現時点では地震と1対1の対応はつけないが、研究の進展とともに因果関係が明らかにされ、地震研究にDCプローブ（電子温度プローブ）が応用できる可能性がある。1947年米国に持ち込まれたV-2 rocketによる電離層の観測が始まって本年はちょうど60年、ようやくにして基礎研究が実用に供される時が来ようとしていると考えると感慨深いものがある。

3. 2. 2 プラズマ圏の電子温度

上部電離圏ではDCアンプの性能上、DCプローブが原理的に使用できるのは中低緯度で高度約 10000 km までであり、高緯度のカusp領域を越えると電子密度が急激に減少しDCアンプを用いてデータを取得できるのは約 3000 km までである。それより上部は二次電子増倍管などを利用した測定系を構築せざるを得ない。また昼間は太陽光によるプローブ電極からの二次電子は周囲の電子による電流より多くなり得るためにDC的な測定法は不向きである。



図11 科学衛星“あけぼの”と太陽電池パドルの先端に取り付けられた円板状プローブ。

日本の科学衛星‘あけぼの’に二次高調波を用いた円板プローブを搭載した(図11)。これによって、内部プラズマ圏の中、低緯度における電子温度が高度8000 kmまではじめて系統的に測定された。この高度では太陽紫外線によるDCプローブ表面からの二次電子電流はプラズマによるDCプローブ電流より大きくなるために電子温度の計測は難しい。これまで米国衛星S3-3による高度5000 kmまでの極めて貧弱なデータが公表されている(Rich et al., 1979)のみである。米国の科学衛星ISIS-1に搭載された円筒型DCプローブで高度3000 kmまでのデータが蓄積され、モデルが作られている(Brace and Theis, 1981)。「あけぼの」による電子温度測定成功の2つの要因は、円板電極を太陽電子パネルに垂直に置いた事により、電極からの二次電子放出を大きく抑圧できたこと、二次高調波法により二次電子によるDC電流を除去出来た事にある。電子温度、イオン温度、及び中性ガス温度はこの高度ではほぼ等しいので電子温度測定そのものがこの高度領域の熱構造を知る事になる。図14は高度8000 kmまでの朝方において、緯度10-30度で、観測された電子温度高度分布の平均とその理論の比較である。

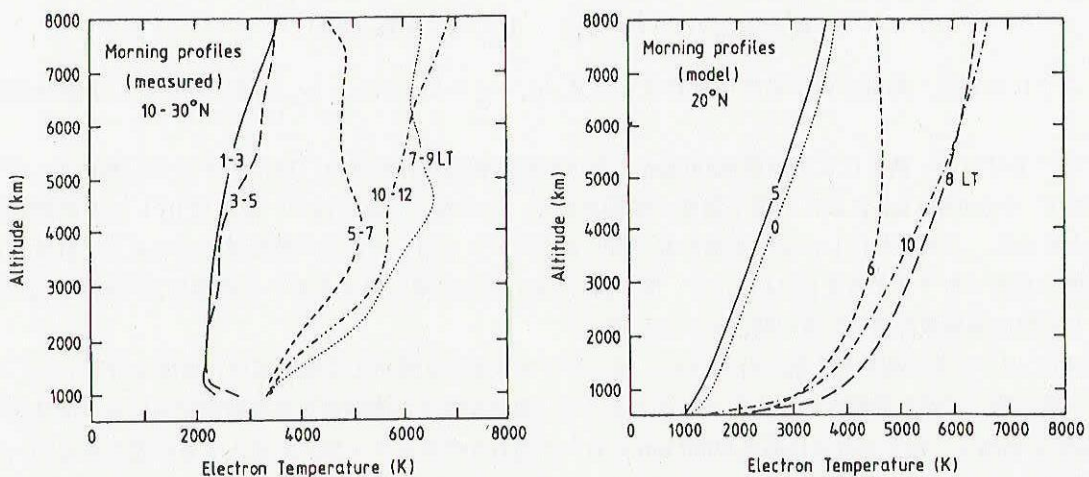


図12 科学衛星‘あけぼの’により得られた朝方の高度8000 kmまでの電子温度高度分布(左)と英国シェフィールド大学との共同研究により得られた理論計算による高度分布(右)。

図13は二つの緯度領域における、3つの高度領域の電子温度の日変化である。高度5500-6500 kmをの除いて朝、夕方における電子温度の極大が見られるが之は電場と中性風を考慮することにより、理論計算で再現できる(Balan et al., 1996a, 1996b)。しかし高度5500-6500 kmを除いて地方時12時ごろに見られる極大は理論ではまだ再現されていない。

図12に示したように高度3000 km以下の高度において実測された電子温度はSheffield大学による理論値より高度の減少と共に、より急激に減少する。この食い違いは熱伝導係数を以下のように書き換える事によって理解できる(Pavlov,

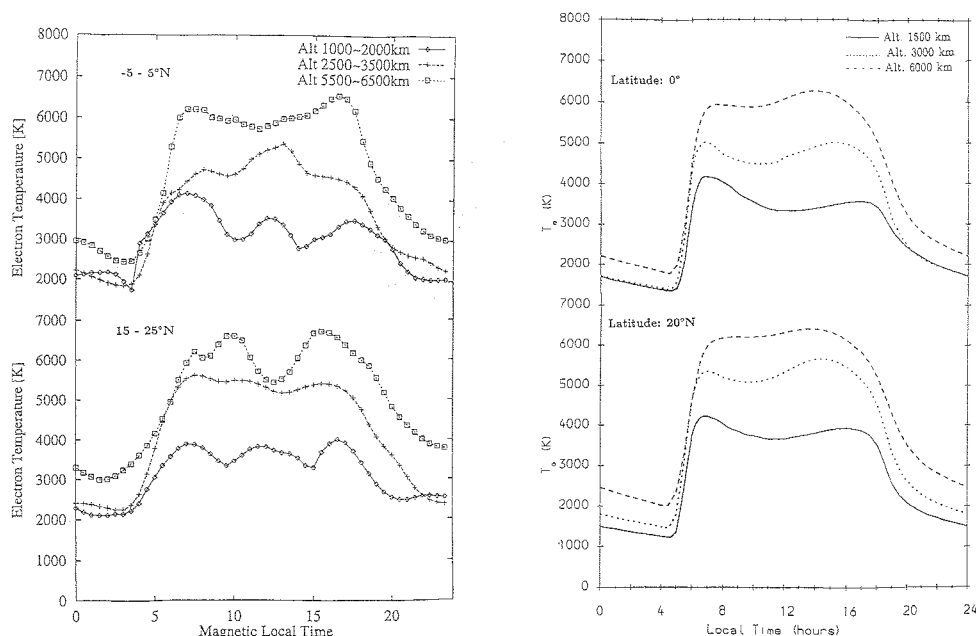


図 13 科学衛星「あけぼの」により得られた、3つの緯度領域、3つの高度領域における電子温度の時間変化（左）と英国シェフィールド大学との共同研究により得られた理論計算による高度分布。

2001). これまで理論計算で用いられてきた熱伝導係数は

$$K_{SH} = C_{SH} N_e k^2 T_e (m_e v_{ei})^{-1}$$

である。ここで v_{ei} は電子イオン衝突周波数、 k はボルツマン定数、 m_e は電子質量、 N_e は電子密度、 $C_{SH} \doteq 3.20$ 。あらたに理論計算に取り入れられた熱伝導係数は

$$K_e = K_{SH} / (1 + C\lambda / L_p) \quad L_p = T_e (\partial T_e / \partial S)^{-1}$$

である。ここで C は定数、熱電子の平均自由行程は $\lambda = V_T / v_e$ 、 $v_e = \Sigma v_{ei} + \Sigma v_{en}$ (v_{en} は電子—中性粒子衝突周波数) である。

IS レーダと「あけぼの」衛星による高度 8000 km における同時観測が行われた。IS レーダでは約 600 km までの電子温度、 あけぼの では 8000 km における電子温度が観測された。この場合「あけぼの」衛星は IS レーダが観測した空間を通る磁力線上にある。このまれにしかない幸運の基で得られたデータを用いて新しい熱伝導の式を入れて計算しなおした電子温度、密度の高度プロファイルを図 14 に示す。図 14 にはまた従来の熱伝導式を用いた数値計算の結果も示されている。明らかに新しい熱伝導係数を用いた方が観測データに近い。

図 14 においてはプラズマ圏の最上部で注入される熱エネルギー量を 3 種かえて電子温度、密度を計算した。電子密度は熱エネルギー量に関して殆ど影響されないことが言える（この事実が電子温度観測を地震研究に用いる可能性を示唆している）。電子温度を理論に一致させるには高度 8000 km において何らかの熱エネルギーを注入する必要があるが、熱源の発生場所、其の種類は全く未知である。

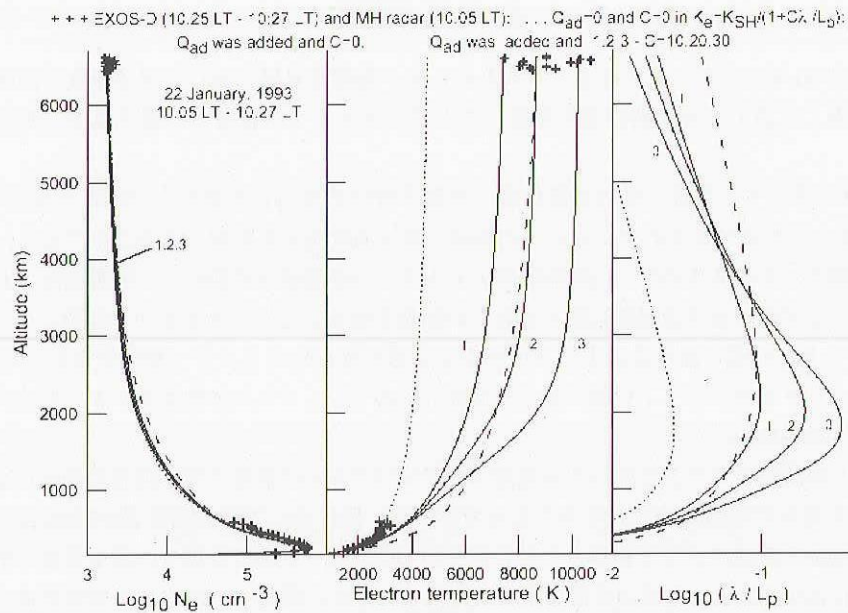


図 14 IS レーダにより得られた高度 600 km までの電子温度、密度と「あけぼの」衛星による高度 8000 km における電子温度、密度の同時観測。点線は之までの熱伝導係数で且つエネルギーを注入しない時、切れ切れの線はエネルギー注入は行ったが従来の熱伝導の式を用いたもの、実線はエネルギーを注入すると共に新しく導入した熱伝導係数による。
 「あけぼの」衛星は 1989 年に打ち上げられ、2005 年 4 月の現在に至るまでデータを送信してきている。初期に得られたデータを用いて内部プラズマ圏の電子温度モデルを作成した。図 15 はその一例である (Kutiev et al., 2002, 2004)。現在のモデルでは太陽活動度依存性、季節依存性は考慮されておらず、これらを考慮したモデルの構築は貴重なデータを有する日本の責務であろう。

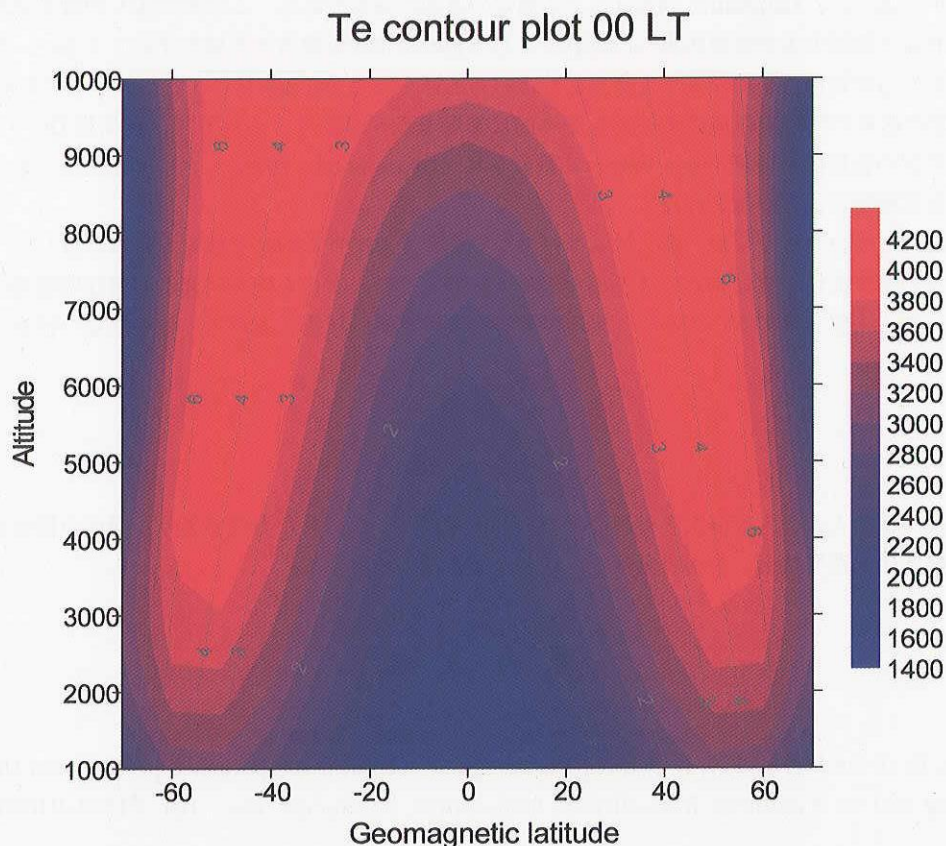


図 15 I 長年に亘って蓄積されてきた電子温度データにより構築された電子温度モデルの一例。

4. 今後の問題

科学観測ロケットの約50年にわたる長い歴史にもかかわらず、電離圏E層における電子温度の問題は未だ完全に解決されていない。この鍵を解くと思われる夜間の電子温度、およびスボラデックE層中の電子温度の測定がなされなければならない。

我々は高度90 kmから測定するため、排気装置付き二次電子増倍管を用いた新たな計測器を開発しつつある（下山他, 2004）。この測定器はまたこれまでなされてこなかった夜間の電子温度測定を可能にするだけでなく、熱的電子エネルギーと光電子エネルギー領域のいわゆる1 eV～5 eV領域のエネルギー分布測定を可能にし、振動励起された窒素分子と電子とのエネルギーのやり取りなど原子分子素過程に関する新しい知見を得ることができるものと期待している。

赤道エレクトロジェット中の電子温度は過去に一度不完全な形で私たちによって一度測定されたのみであり（Sampath et al., 1974）、赤道帯エレクトロジェット自体に関する研究も含めてジェット内の熱エネルギー収支に関する研究は全くなされていないといわざるを得ない。

これまで電子密度でしか議論されてこなかった低緯度プラズマバブル中の詳細な電子温度の測定はプラズマバブル内の熱エネルギー収支に関するあらたな議論の材料をあたえるであろう。高緯度における高度3000 km以上の電子温度計測に関しては、Langmuir Probeと直流アンプを組み合わせた従来のDCプローブ法では周りの微小電流を計測するには不十分である。この高度の計測は高度100 km付近の夜間の電子温度測定のために開発中の測定器を排気装置なしで使用する事により可能となる。

また同時に之まで得られた衛星データの解析はすべて終了したとは言いがたい。たとえば“あけぼの”による電子温度データを用いた内部プラズマ圏の朝夕における南北両半球のプラズマ輸送など、これまでデータが得られていなかったゆえに外国研究者に手がでなかった研究課題が残っている。

5. おわりに

ここでは主に地球電離圏におけるLangmuir probe法の応用とそれから得られた最近の成果について述べた。特に問題の多い電子温度について述べた。Langmuir probeによる測定の原理は簡単である。この故に多くの研究者が容易にプラズマパラメータを得られると誤解するが電極汚染への考慮なくして正確な情報を得ることはまずありえない。米国での信頼できる電子温度測定は私たちが電極汚染の深刻さを指摘した後打ちあげられたDE-2衛星によるものからである。

DCプローブは他の惑星の電離圏研究においても基本的に重要な役割を担う。これまで、円筒型DCプローブが1978年に打ち上げられた米国の金星探査機Pioneer Venusに搭載され（Brace et al., 1978）、之により磁場のある地球電離圏と磁場が極端に弱い金星電離圏の違いが示された。

測定器の開発は時間と労力を費やすが、新しいユニークな計測なくして世界の最先端を走る事は難しい。残念ながら日本の火星探査機は火星の探査前に通信途絶という不運な故障で終わったが、次代を担う研究者が地球電離圏研究で得られた技術と知見を持って、夢と希望を捨てることなく、来るべき日に向けて実験技術をみがき、他の惑星の探査に積極果敢に取り組むことを望みたい。

謝 辞

本講演は本研究会の世話人の一人東海大学谷川隆夫教授の依頼によりなされたものであり、講演の機会をあたえてくださった教授と、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部船木助教授に感謝する。

参 考 文 献

Balan, N., T. Abe, G. J. Bailey, and K.-I. Oyama, Plasmasphere electron temperature profiles and the effects of photoelectron trapping and an equatorial high-altitude heat source, J.Geophys. Res., 101, 21689–21696, 1996a.

Balan N., K.-I. Oyama, G. J. Bailey and T. Abe, Plasmasphere electron temperature studies using satellite obser-

vations and a theoretical model, *J. Geophys. Res.*, 101, 15323–15330, 1996b.

Brace, L.H., R.F. Theis, Global Empirical models of ionospheric electron temperature in the upper F-region and plasmasphere based on in situ measurements from the AE-C, ISIS-1 and ISIS-2 satellites, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 43, 1317–1343, 1981.

Druyvesteyn, M.J., Der Niedervolt Bogen, *Z. Physik*, 64, 781–798, 1930.

Hedin, A.E., Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 96, 1159–1172, 1991.

Hirao, K., and K. Oyama, An improved type of electron temperature probe, *J. Geomag. Geoelectr.*, 22, 393–402, 1970.

Kawashima, T., A measurement of vibrational-rotational temperature and density of molecular nitrogen in the upper atmosphere by rocket-borne electron beam induced luminescence, ISAS Report, No.672, 1999.

川島高弘, 小山孝一郎, 鈴木勝久, 岩上直幹, 小川利紘, 置田彩子, 福山恒太, 野田亮, 熱圏下部の窒素分子振動温度, 回転温度及び数密度—観測ロケット S-310-24 号機による観測—宇宙科学研究所報告 95 号, 1997 年.

Kurihara, J., K.-I. Oyama, K. Suzuki, and N. Iwagami, Vibrational-rotational temperature measurement of N₂ in the lower thermosphere by the rocket experiment, *Adv. Space Res.*, 32, 725–729, 2003.

Kutiev, I., K.-I. Oyama, S. T. Abe and P. Marinov, Plasmasphere Electron temperature structure model based on Akebono data, *Adv Space Res.* 33, 975–979, 2004.

Kutiev, I., Oyama, K.-I., T. Abe, Analytical representation of the plasmasphere electron temperature distribution based on Akebono data, *J. Geophys. Res.* 107(A12), 1459, doi: 10.1029/2002JA009494, 2002.

Langmuir, I., and H. Mott-Smith, Studies of electric discharges in gases at low pressures Part I-V, *General Electric Reviews*, 28, 449–455, 538–548, 616–623, 762–771, 810–820, 1924.

Oyama, K.-I., Characteristic of the contaminated Langmuir probe and countermeasures for its application to the space observations, ISAS Report No. 525, 1975.

Oyama, K., and K. Hirao, Application of grass-sealed Langmuir probe to ionosphere study, *Rev. Sci. Instr.*, 47, 101–107, 1976.

Oyama, K., A systematic investigation of several phenomena associated with contaminated Langmuir probes, *Planet. Space Sci.*, 24, 183–190, 1976b.

Oyama, K., and K. Hirao, Inaccuracies in electron density estimates due to surface contaminated Langmuir probes, *Planet. Space Sci.*, 24, 87–89, 1976a.

Oyama, K., and K. Hirao, Evidence of a distorted energy distribution in ionosphere plasma, *Planet. Space Sci.*, 24, 900–904, 1976.

Oyama, K., and K. Hirao, Anomalous heating of the thermal electrons near the focus of the current vortex, *J. Geomag. Geoelectr.*, 31, 11–19, 1979a.

Oyama, K., and K. Hirao, Distortion of the energy distribution of ionospheric thermal electrons near the focus of Sq current vortex, *Planet. Space Sci.*, 27, 183–192, 1979b.

Oyama, K.-I. and K. Hirao, Is T_e equal to T_n at the height of 100 to 120 km?, *Planet. Space Sci.*, 28, 207–211, 1980.

Oyama, K.-I. and K. Hirao, Energy gain of thermal electrons from the excited neutral gases, *J. Geomag. Geoelectr.*, 37, 913–926, 1985.

- Oyama, K.-I., K. Schlegel, and S. Watanabe, Temperature structure of plasma bubbles in the low latitude ionosphere around 600 km altitude, *Planet. Space Sci.*, 36, No.6, 553–567, 1988.
- Oyama, K.-I., Electron temperature measurements carried out by Japanese scientific satellites, *Adv. Space Res.*, 49-(10)158, 1991.
- Oyama, K.-I., S. Watanabe, Y. Su, T. Takahashi, and K. Hirao, Season, local time, and longitude variations of electron temperature at the height of ~ 600 km in the low latitude region, *Adv. Space Res.* 18, (6), (6)269–(6)278, 1996.
- Oyama, K.-I., M.A. Abdu, A. Piel, and H. Thiemann, What is happening near Sq Focus?, *Adv. Space Res.*, 26, 8, 1263–1266, 2000.
- Oyama, K.-I., In situ measurements of Te in the lower ionosphere a review, *Adv. Space Res.*, 26, 8, 1231–1240, 2000.
- Oyama, k.-I., P. Marinov, I. Kutiev, and S. watanabe, Low latitude model of Te at 600 km based on Hinotori satellite data, *Adv. Space. Res.*, 34, 2004–2009, 2004.
- Pavlov, A.V., T. Abe, and K.-I. Oyama, Comparison of the measured and modeled electron densities and temperatures in the ionosphere and plasmsphere during the period of 25–29 June 1990, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 63, (6), 605–616, 2001.
- Pavlov, A.V., The role of vibrationally excited oxygen and nitrogen in the D and E regions of the ionosphere, *Ann. Geophysicae*, 12, 1085–1090, 1994.
- Pavlov, A.V., T. Abe, and K.-I. Oyama, Comparison of the measured and modeled electron densities and temperatures in the ionosphere and plasmasphere during the undisturbed and geomagnetic storm period of 20–30 January 1993, 18, 1257–1272, *Annales Geophysicae*, 2000.
- Panicca, F., C. Gorse, J. Bretagne, and M. Capitelli, Electron energy distributions in molecular nitrogen: The role of super elastic electronic collisions in discharge and post discharge conditions, *J. Appl. Phys*, 59(12), 4004–4006, 1986
- Piel, A., K.-I. Oyama, H. Thiemann and A. Morioka, Resonance Cone Measurements of Non-Thermal Plasma Properties in the Mid-Latitude Ionosphere, *Adv. Space Res.*, 8, (8)143–(8)146, 1988.
- Rich, F.J., R.G. sagalyn, and P.J.L. Wildman, Electron temperature profiles measured up to 8000 km by S3–3 in the late afternoon sector, *J. Geophys. Res.*, 84(A), 1328–1333, 1979.
- Rohde, V., A. Piel, H. Thiemann and K.-I. Oyama, In situ diagnostics of ionospheric plasma with the resonance cone technique, *J. Geophys. Res.*, 98, 19163–19172, 1993.
- Sampath, S., T. S. G. Sastry, K. Oyama, and K. Hirao, Joule heating due to the equatorial electrojet as observed by rocket borne probes, *Space Res.*, XIV, 253–258, 1974.
- Su, Y. Z., K.-I. Oyama, G. J. Bailey, T. Takahashi, and H. Oya, Longitudinal variation of the topside ionosphere at low latitude; satellite measurements and mathematical modelling, *J. Geophys. Res.*, 101, 17191–17205, 1996.
- Su., Y. Z., G. J. Bailey, K.-I. Oyama and N. Balan, A modelling study of the longitudinal variations in the north-south asymmetries of the ionospheric equatorial anomaly, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 59, 1299–1310, 1997.
- Watanabe S., and K.-I. Oyama, Effects of neutral wind on the electron temperature at a height of 600 km in the low latitude region, *Ann. Geophysicae*, 14, 290–296, 1996.
- 下山学, 塚田有司, 岡部選司, 小山孝一郎, ラングミュアプローブ測定におけるカウンターエレクトロードの影響, 地球惑星科学合同大会 2004. 5. 12.

下山学, 塚田有司, 岡部選司, 中村良治, 小山孝一郎, カウンターエレクトロードのDCプローブ特性への影響, スペースプラズマ研究会, 2004. 3. 18.

小田琢也, 電子温度測定における飛翔体シースの影響とその除去法について, 東京大学修士論文, 2002. 2. 28, 2001年.