

静電プローブのデータ解析

航空宇宙技術研究所 ○和田安弘、渡辺泰夫
 宇宙開発事業団 秋元敏男
 日産自動車(株) 安井英巳

OREX 大気圏再突入時の電子密度を調べるために静電プローブのデータ解析を行った。OREX では静電プローブによりイオン飽和電流が計測され、その計測値は、高々度側で約 100km、低高度側で 75km ないし 85km の間で所定の測定レンジに納まった。また静電プローブの温度もその許容温度 500°C 以下に抑えられたことが確認された。この計測されたイオン飽和電流値を用いて、静電プローブ理論に従い電子密度の計算を行った。その際流れの速度および電子温度の値も必要になるが、これらの情報を補うために、最良推定突入軌道に沿って一連の飛行条件下での流れの計算 (CFD) もなされた。CFD では物理モデルとして 1 温度モデルと Park の 2 温度モデルの 2 種類の計算を行ない、物理モデルが実験の電子密度解析にあたえる影響を調べた。その結果、高度 90km 以上で 1 温度モデルと 2 温度モデルの計算結果に有意な差が生じるものの、その差は電子密度のデータ解析には大きく影響を及ぼさないことが確認された。計測されたイオン飽和電流のレンジは 1 μ A から 10mA の範囲であり、対応する電子密度は、 10^{15} から 10^{19} 個/m³ と計算された。さらに、得られた電子密度を CFD による結果と直接比較し、計算に用いた物理モデルおよび壁条件の有効性について検討した。

DATA ANALYSIS OF ELECTROSTATIC-PROBE

NAL ○ Yasuhiro WADA, Yasuo WATANABE
 NASDA Toshio AKIMOTO
 NISSAN Hidemi YASUI

In order to investigate electron number density of OREX re-entry flight environment, the electrostatic-probe data are analyzed with a help of CFD (Computational Fluid Dynamics). Following the probe theory, the electron number density is calculated from the ion saturation current measured by the electro-static probes. Although the theory also requires information of flow velocity and electron temperature, neither of them strongly affects the electron number density, and CFD supplements these data. During the re-entry phase at altitudes from 100km to 75km/85km, OREX obtained valid ion saturation current data, which are almost free from under/over flow, and the probe are estimated to be kept under the breakdown temperature, 500°C. In this data analysis, the re-entry flow fields are simulated along the best estimated flight trajectory using the one-temperature model and Park's two-temperature one. The calculated electron number density is ranging from 10^{15} to 10^{19} /m³. These results are directly compared with the numerical results, and the validity of the physical model and wall condition used in CFD is discussed.

1. はじめに

OREX には、大気圏再突入時の機体周り発生する高温気体の電子密度を測定するために静電プローブシステムが搭載された。静電プローブには-5V の定常電圧がかけられイオン飽和電流が計測された。静電プローブは電離気体の測定装置であり、OREX の中でも高温気体の局所的な情報が得られる数少ない計測ミッションの1つである [1]。ここでは、テレメータデータから得られた 8-bit のデジタル情報から有効なイオン飽和電流を抽出し、電子密度の計算を行った。イオン飽和電流から電子密度を求めるためには気流の速度と電子温度の情報が不可欠であり、これらは CFD(Computational Fluid Dynamics) により補った。この解析では電子密度に関して CFD を検証するデータを提供することが期待されると同時に、その解析自体に CFD の結果が必要であり、CFD と実験解析の間に密接な関係があることに注意が必要である。

2. OREX 静電プローブシステム — イオン飽和電流の測定

OREX の静電プローブシステムは、1969 年に米国により行われた再突入実験 RAMC-II[2] の電子密度計測を参考にして設計された。しかし、OREX の大気圏再突入速度は約 7.5km/sec で RAMC-II の 5.3km/sec に比べかなり大きく、RAMC-II に比べ電離反応による電子密度とプローブに対する熱的な負荷が大きくなることが予想された。そこで、OREX では CFD による予備計算 [2] 等の情報をもとに、イオン飽和電流の測定レンジ、プローブシステム形状が決定された。OREX の静電プローブシステム形状および取付位置を図 1 に示す。

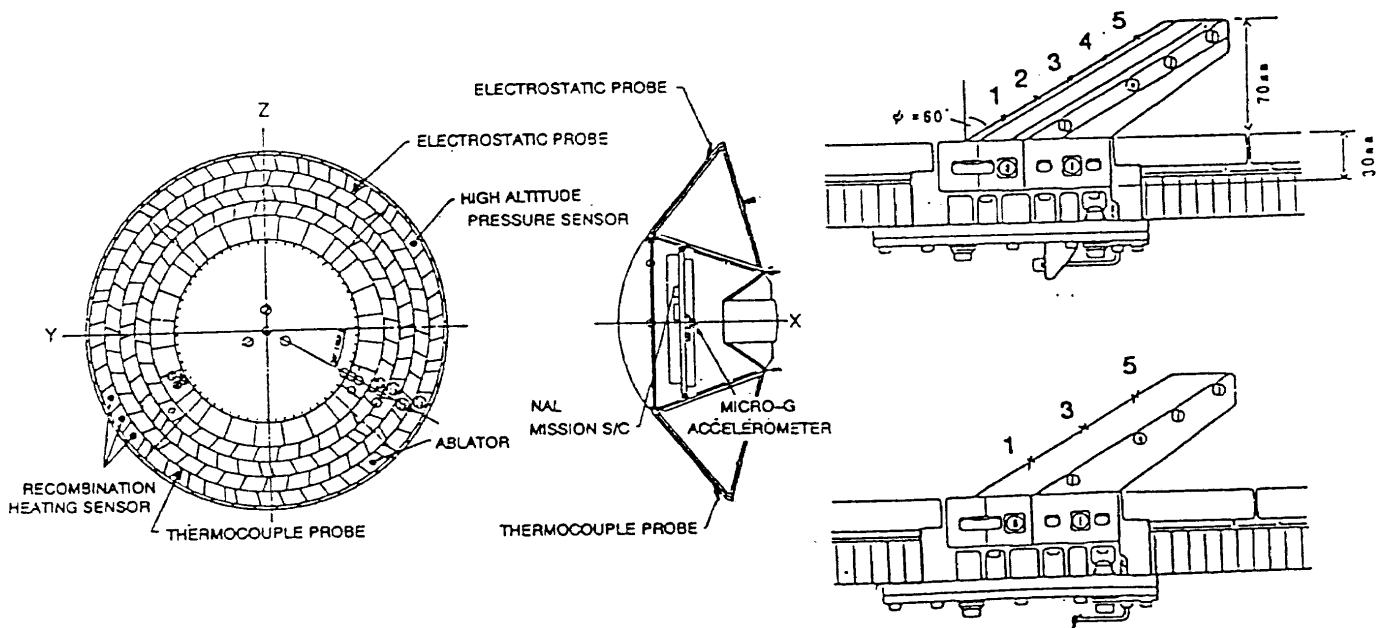


Fig. 1a OREX.

Fig. 1b Electrostatic/thermocouple-probes.

プローブシステムは、先端の負電極、側面の正電極、およびそれらを支え電氣的に絶縁する構造材から成る。電極材料は正負電極ともタングステン、構造材は熱伝導性に優れたセラミック材 (シェーパル M) が採用された。プローブシステムを熱的負荷から守るためにその取付角度は 60°と RAMC-II の 45°に比べて大きくとられた。負電極 (静電プローブ) はプローブ理論が適用できるように小さく設計され、高さ方向に 11.665mm から

58.335mm まで約 11.67mm 間隔に計 5 つの電極がプローブシステム先端に埋め込まれた。負電極の形状は半径 0.1mm 突出高さ 0.1mm 長さ 5mm の半円柱である。正電極は負電極側でイオン飽和電流が確保されるように十分大きな面積がとられ、正負電極の電位差は 5V に保たれた。高温時には電極間の絶縁破壊が問題となる。絶縁破壊はイオン飽和電流(電子密度)の見積過剰を引き起こすので注意が必要である。OREX では、データの信頼性を確認するために静電プローブシステムの反対側に静電プローブシステムと同形状のものを設置し熱電対によりフライト時に温度をモニターした(図 1 参照)。熱電対の数は 3 個であり、それぞれ、静電プローブの 1、3、5 に対応する位置に取り付けられている。フライト前の実験では、プローブシステムが 450°C から 550°C に上昇する間に、電極間の絶縁抵抗が 1MΩ から 10KΩ へと急激に減少することが確認されている。測定すべきイオン飽和電流のレンジが数 μA から数 mA のオーダーであることを考えると、500°C 程度が絶縁破壊の生じる温度の目安と見ることができる。大気圏再突入中、数桁にわたって大きく変化するイオン飽和電流を測定するために、各プローブからのデータはそれぞれ fine と coarse の 2 つの計測レンジで 2 重に測定された。

3. 静電プローブ理論 — 電子密度の計算法

プローブ理論 [3、4] により静電プローブにより測定されたイオン飽和電流からイオン密度を計算することができる。プラズマ状態ではイオン密度は電子密度と等しくイオン密度は電子密度と考えられる。電離気体中でプローブにかける電圧をマイナス側に下げていくとまわりのイオンは加速され電子は減速される。荷電粒子の熱運動にくらべて十分に電圧を下げた状態(プラズマの世界では電圧 1V が温度 1 万度に相当する)ではプローブのまわりにイオンの過剰な層ができて、イオンの遮蔽効果のためにこの領域外では電界がほぼ 0 になる。この薄い層はシースとよばれ、シースのなかに閉じこめられた強い電界により電子はほとんどプローブまでたどり着けずに追いかえされる。その結果、熱速度でイオンシースに飛び込んでくるイオンの数がプローブに流れる電流を決定することになり、電流値は印加電圧によらず一定値に近づく。これがイオン飽和電流である。Bohm のシース基準によるとイオンは電子温度で評価された熱速度でシースに飛び込んでくるのでランダムイオン電流(シースの厚さを無視した理想的なイオン飽和電流) I_r は次式で与えられる:

$$I_r = \frac{nev_+}{4}(2\pi R_p L) \quad (1)$$

ここでプローブ形状は円柱を仮定して R_p はその半径、 L は長さである。 n はイオン数密度、 e はそのイオンの電荷、 v_+ は電子温度で評価された熱速度で次式であたえられる:

$$v_+ = \sqrt{\frac{2kT_e}{M}} \quad (2)$$

ここで k はボルツマン定数、 T_e は電子の並進温度、 M はイオンの質量である。

実際に得られるイオン飽和電流は次の 2 つの効果によりランダムイオン電流からずれる:

- シースに厚さがあることによるプローブの表面積の実質的な増大;
- 気流に流れがあることによるイオン流束の増大。

今回の電子密度計算では文献 [3] に従い、これらがイオン飽和電流と電子密度の関係に与える影響を考慮した。しかしながら、これらの効果によるイオン飽和電流への補正係数は 1 のオーダーである。従って基本的には (1) 式がイオン密度とイオン飽和電流を関係づける式であり、イオン飽和電流はイオン密度の 1 乗、電子温度の $1/2$ 乗に比例することになる。これによると、測定していない電子温度もイオン飽和電流に影響を与えてしまうことになるが、電子温度は比較的变化が小さく、さらに、飽和電流に $1/2$ 乗でしかかかないのでその不確実性の影響は小さい。従ってイオン飽和電流を計測することによって電子密度 (イオン密度) を推定することが可能となる。

4. CFD による数値シミュレーション

今回、静電プローブ解析に並行して OREX 周りの流れの数値シミュレーションを行った。計算の目的は以下の 2 つである:

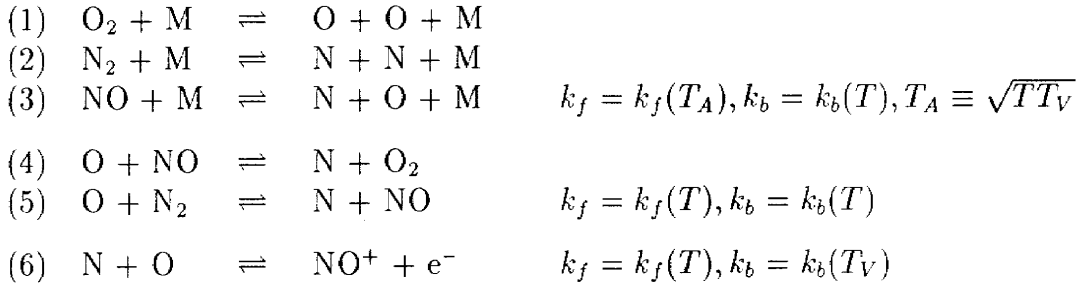
- 計測されたイオン飽和電流からプローブ理論を用いて電子密度を求める際に、流速と電子温度の情報を提供する;
- 実験から求められた電子密度と CFD から直接計算された電子密度を比較し CFD の検証をおこなう。

上記の目的を達成するためにはある飛行条件で 1 回計算を行っただけでは不十分である。フライトにより得られた同じフレームでの飽和電流のデータセットもそのデータ取得時間はプローブごとに異なっている。電子密度を解析して全体的な傾向を調べるためにも飛行経路に沿った流れの情報が時間軸に対して連続的に必要となる。そこで最良推定飛行経路に沿って Elapsed Time で 1.6 秒ないし 3 秒おきに計算をおこない、その間のデータは線形補間で求めることにした。今回の計算では標準大気を仮定した。また、物理モデルが解に与える影響を調べるために、1 温度モデルと 2 温度モデルの両方を用いて計算を行った。これにより約 50 ケースの計算が必要となった。

ここで計算に用いた物理モデルの説明をしておく。再突入物体周りの高温気体では、分子振動励起、電子励起、解離/電離の化学反応等の現象が現れる。このような流れ場を数値的にシミュレートするためには、まずどのような物理モデルを仮定するかということが問題となる。励起に要する時間が流れの特性時間に比べ十分に早ければ平衡流れを仮定したモデルで十分であり、その逆ならば凍結流れでよい。問題なのはその中間の非平衡流れである。一番簡単なものとしては、化学反応は流れと非平衡であるが、化学種粒子内部の自由度に起因する分子振動/電子励起/分子回転エネルギーは、並進エネルギーと平衡状態にあると仮定するものがある。これが 1 温度モデルであり飛行高度が低く粒子の衝突頻度が内部エネルギーを励起するのに十分であれば有効なモデルであると考えられる。しかし高度が高い場合には粒子内自由度の非平衡 (熱的非平衡) を考慮したモデルが必要となる。このようなモデルとして Park らの提案している 2 温度モデルがある [5]。これは分子振動/電子励起は、並進/回転エネルギーと必ずしも平衡状態になく、それぞれ別の温度で表せられるとしたものであり熱的非平衡を考慮したモデルとしては簡単なものの 1 つである。2 温度モデルの化学反応速度は並進温度だけではなく振動温度にも支配され、振動温度は振動緩和モデルに依存する。Park らは高温での非調和振動子の効果を考慮した拡散的振動緩和モデルを提案している。

ここでは、上記の 2 温度モデルと 1 温度モデルを用いて CFD の計算を行い、電子密度の解析にその結果を用いた。また、化学反応モデルとしては O_2 、 N_2 、 N 、 O 、 NO 、

NO⁺、e⁻ の 7 化学種による Blottner の化学反応を考慮した。以下に化学反応と 2 温度モデルを用いた場合の反応の並進、振動温度依存性を示す:



計算格子は格子点数 70×88 のものを代数的方法により生成し、計算方法としては非平衡流れに一般化された Roe の近似リーマン解法を Chakravarthy-Osher の TVD 法により 2 次精度化したものを用いた。壁条件として、non-slip、1500K の等温、非触媒性を仮定した。図 2a-d に代表的な 2 温度モデルによる計算結果を示す。これらの図には各飛行条件での圧力、並進/回転温度、振動/電子励起温度の空間分布、および、淀み点流線上のそれらの値および各化学種のモル濃度が示してある。

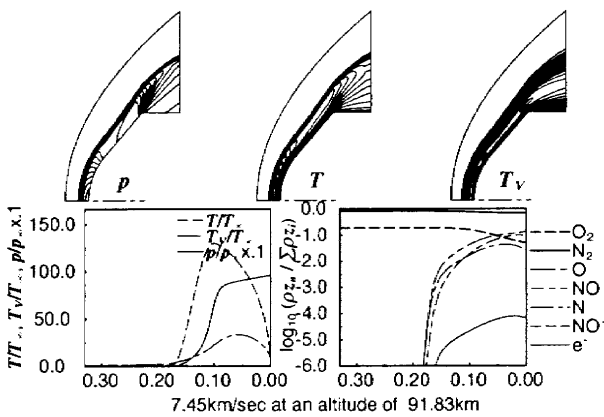


Fig. 2a CFD at an altitude of 91.83km.

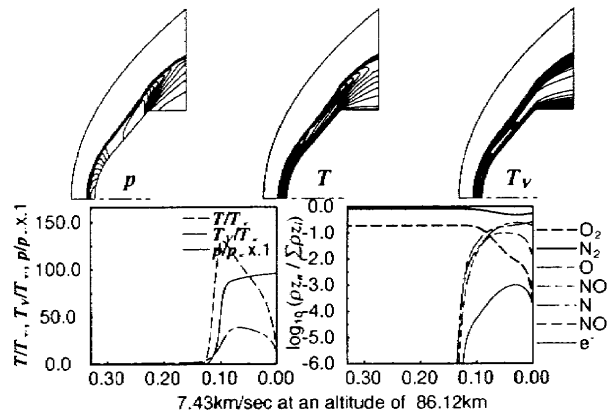


Fig. 2b CFD at an altitude of 86.12km.

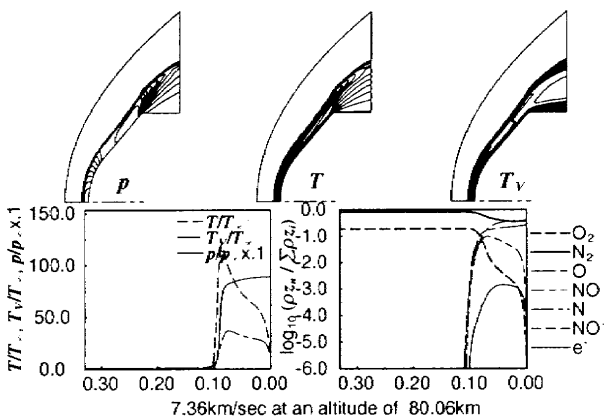


Fig. 2c CFD at an altitude of 80.06km.

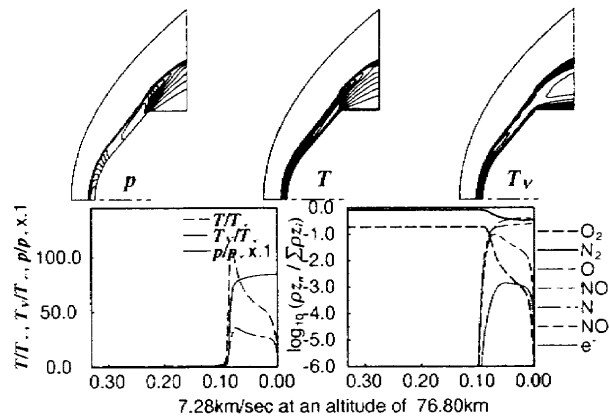


Fig. 2d CFD at an altitude of 76.80km.

5. フライトデータ及び解析

今回の解析では、静電プローブの温度限界等により、飛行高度約 100km から 70km の間に取得されたデータが興味の対象となる。最良推定飛行経路から、高度/飛行速度をこ

の飛行範囲で取り出したものを図3に示す。横軸はH-II打上げ後の経過時間である。この図より高度100kmから70kmでは、速度は7.5km/secから7.0km/secの間、時間と飛行高度はほぼ線形関係にあることがわかる。熱電対によりモニターされた静電プローブの温度履歴が図4である。プローブが壁面から離れている程絶縁破壊の生じる時期が早い、壁近傍のプローブは高度75km付近まで生き伸びている。なお、熱電対は他のセンサーと信号を共用しているため図4では screening と補間の処理を施してある。

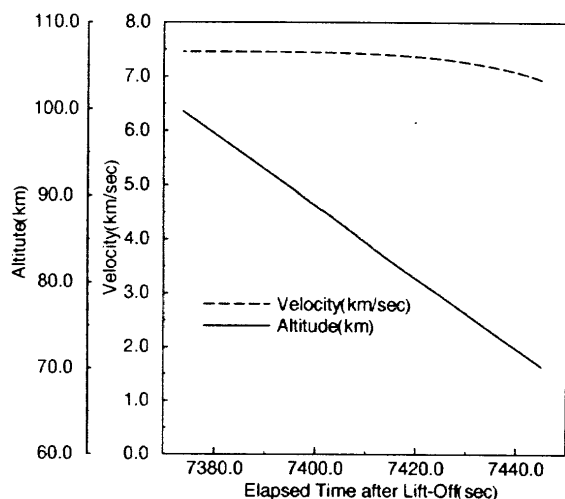


Fig. 3 OREX re-entry trajectory.

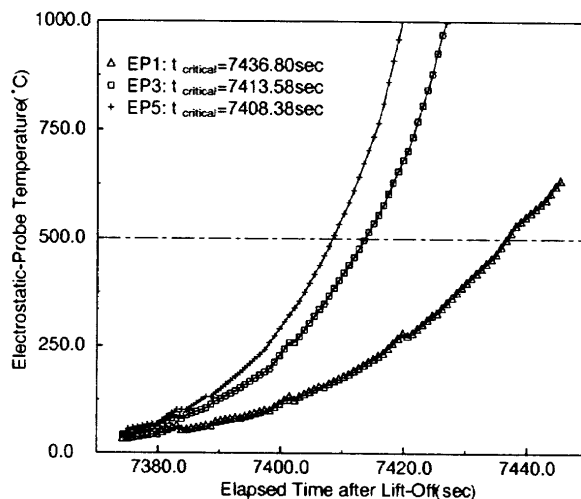


Fig. 4 Probe temperature history.

上記の飛行範囲で、プローブ1から5までそれぞれ fine と coarse のイオン飽和電流の生データを示したのが図5である。オペアンプ特性は最小2乗法により1次式近似している。図を見ると、プローブ1、2での fine と coarse データの不連続等の問題があるのがわかる。ここでは、この生データに対して以下の補正を行なった。

- 各測定データポイントの GCP-PCM の時間からの実計測時間の遅れの補正。
- LPF(Low-Pass Filter) を用いていることによる実計測時間のずれの補正。これは急激に変化するイオン飽和電流に LPF がかかることでデータ取得時間よりも前のデータが記録されてしまう問題である。そこで OREX の実信号波形から LPF の DC 成分における群遅延時間を戻した波形と遅延除去処理を行った結果得られる波形との比較から遅延時間の評価をおこない、プローブ1と3の fine の信号については2.1秒、そのほかの信号については2.0秒の時間遅れを一様に補正すればよいことがわかった。
- 異常信号によるノイズの除去。これは7425秒付近で生じた一律-11デジット(約200mV)の出力急変動の問題で、この変動はNAL計測系の全てのチャンネルに見られる。これは測定系のノイズでその原因はいまのところ明かではないが、本来0になっているべき温度校正用の信号(MI18)をもとにプローブ信号のノイズ除去処理が可能である。
- 桁落ち/桁あふれデータの削除。デジタルデータが0、1、255になっているものは信頼性が低いので除外した。

以上の補正を行った結果が図6であり、fine と coarse の信号が合致している。以後の解析では fine と coarse の信号は区別しない。

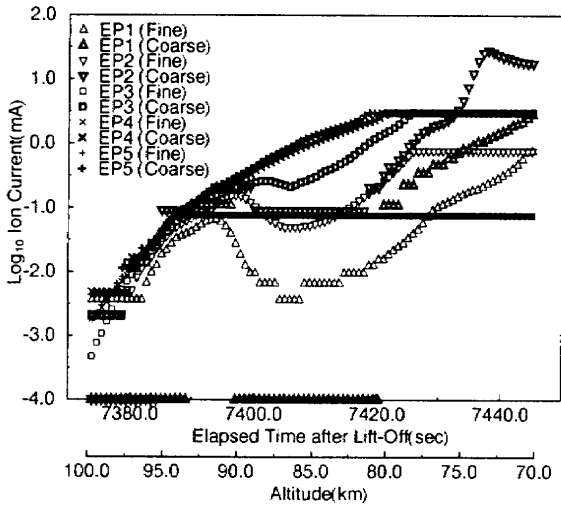


Fig. 5 Raw data of ion-saturation current.

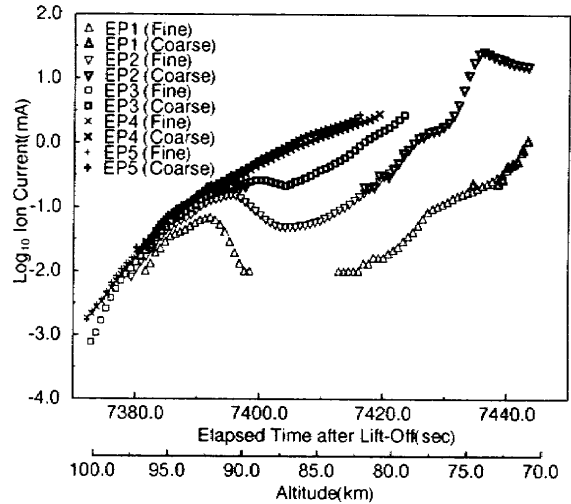


Fig. 6 Refined data of ion-saturation current.

このイオン飽和電流のデータに、CFDにより与えられる情報を加え、プローブ理論を用いて電子密度の計算をおこなった。CFDにより計算された各プローブ位置での温度、速度を図7、8に示す。

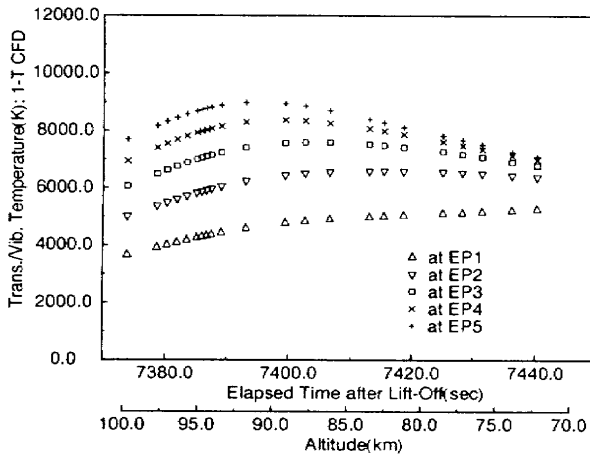


Fig. 7a Temperature by 1-temp. CFD.

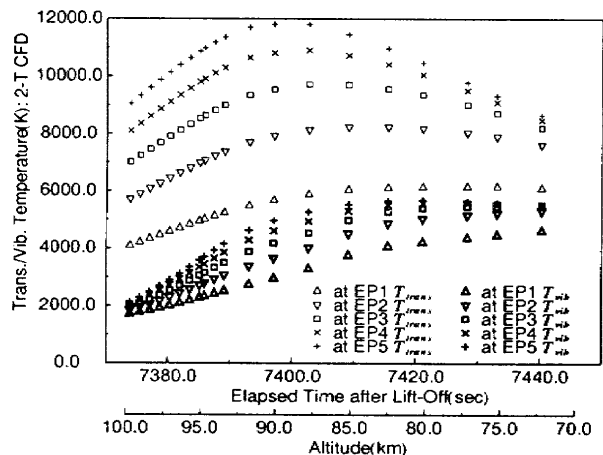


Fig. 7b Temperature by 2-temp. CFD.

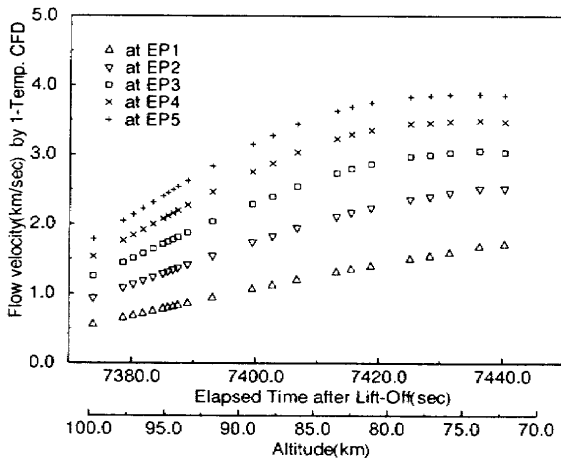


Fig. 8a Velocity by 1-temp. CFD.

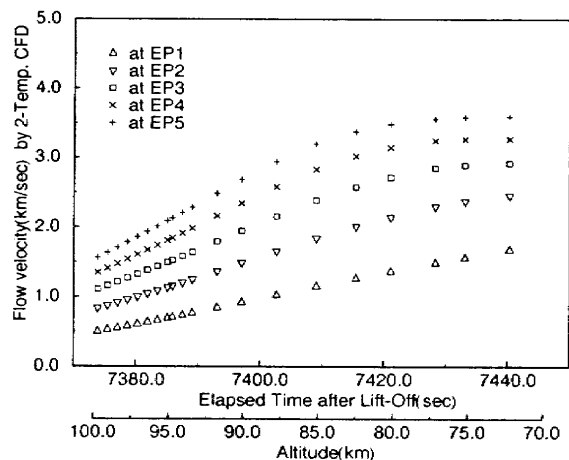


Fig. 8b Velocity by 2-temp. CFD.

このCFDの情報を使って計算した電子密度の時間履歴を、プローブ番号1から5について各プローブごとにまとめたものを図9a-eに示す。

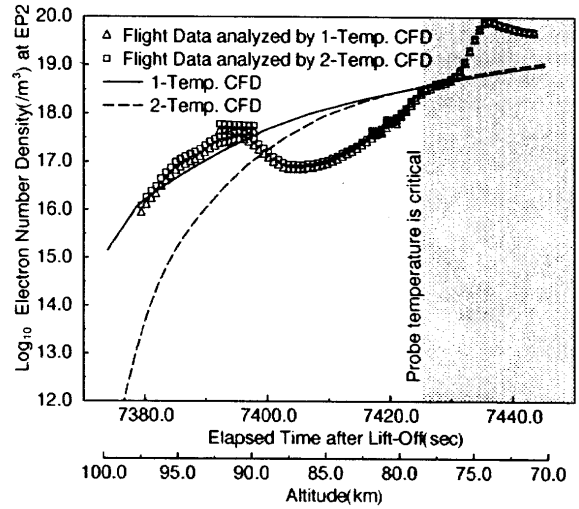
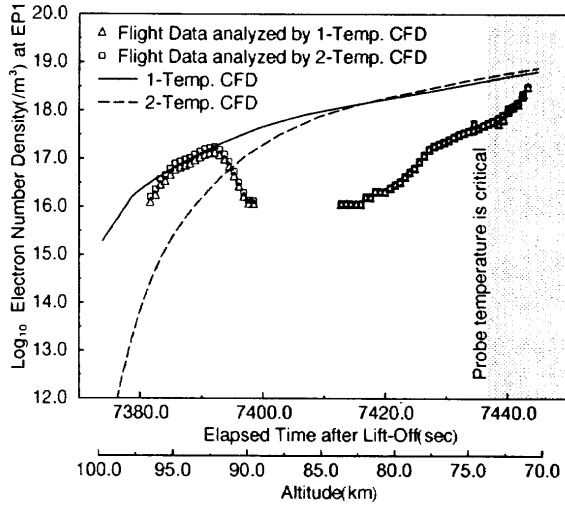


Fig. 9a Electron number density at probe 1.

Fig. 9b Electron number density at probe 2.

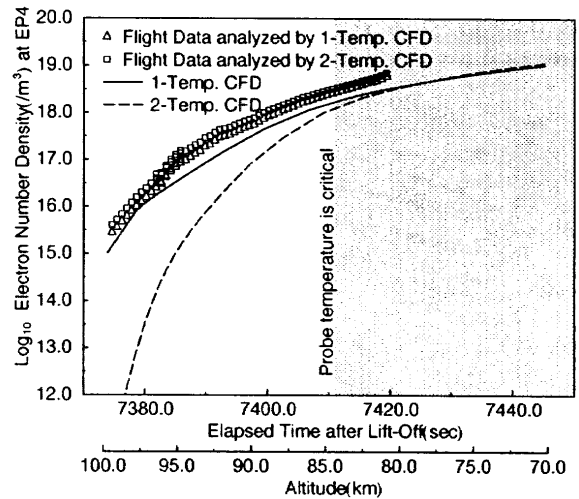
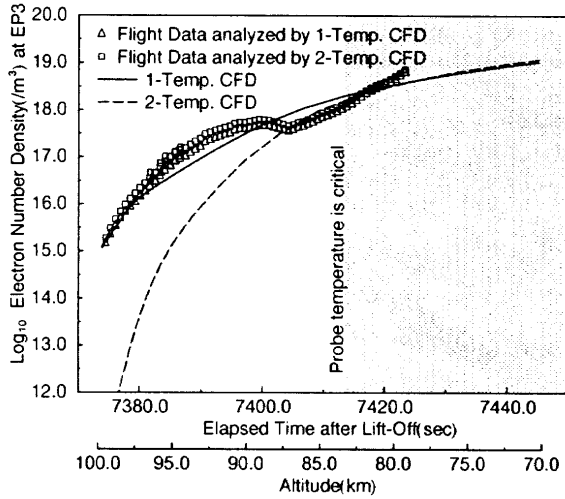


Fig. 9c Electron number density at probe 3.

Fig. 9d Electron number density at probe 4.

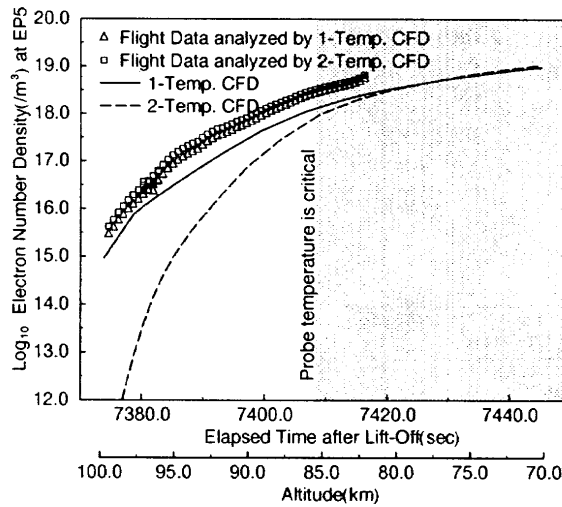


Fig. 9e Electron number density at probe 5.

CFDの結果として1温度モデルによるものと2温度モデルによるものがありそれぞれの情報をもとに実験データを処理したが、図に示されているようにCFDの解の違いが電子密度の計算値にあたる影響は比較的小さい。これは上述したようにプローブ理論から予測される通りである。

静電プローブは、温度が500°Cを越えると絶縁破壊の可能性がある。図9ではハーフトーンでその領域を示している。プローブ2、3の位置に相当する温度はプローブ1、3、5の位置での温度から線形補間で求めている。壁近傍のプローブデータは高度75km、壁から離れたプローブデータは高度85kmより下で信頼性が落ちている。イオン飽和電流から計算された電子密度がこの高度より上で約3桁変化していること、1本の8-bitデータでカバーできる計測レンジの広さがせいぜい2桁ちょっとであることを考えると実験の測定レンジの設定は適切であったと言える。

求められた電子密度の時間変化をみると、壁面から離れた静電プローブ4、5では、高度が下がるに従い単調に電子密度が上昇している。これは高度低下に伴う大気密度の上昇とそれによる化学反応速度が増大することに起因するもので妥当な結果である。それに対して、壁面近傍の静電プローブ1、2、3では、高度85km近傍で電子密度の減少が観察される。図中には2温度モデルと1温度モデルから計算された電子密度も重ねて記されているが、それによると両モデルの計算結果とも全てのプローブ位置で高度に対して単調な変化を示している。この傾向は静電プローブ4、5の飛行実験結果と合致しており、飛行実験の壁近傍での電子分布の非線形な挙動は壁での現象に左右されたものであることが示唆される。その理由として壁表面での局所的な再結合反応の発生等が考えられるが、はっきりした原因究明は現段階では困難である。

2温度モデルと1温度モデルの計算結果を比べると、熱的非平衡の効果(2温度モデルの1温度モデルとの差)は高度80km位から観察され高度が高いところほど顕著である。Parkの2温度モデルでは電離の順反応は並進温度にしか依存しないが、その反応の主役である酸素と窒素の原子の生成は並進温度と振動温度の幾何平均に左右される。分子衝突の少ない高度の高いところでは振動励起に時間がかかるので振動温度が低く抑えられ、解離反応が進みにくくなり、結果として2温度モデルでは1温度モデルに比べ高々度で電子密度が小さくなる。しかし、フライトデータにより求められた電子密度は、2温度モデルよりも1温度モデルの計算結果に近い。もともと、予備計算時に高度90km以上で1温度モデルと2温度モデルで電子密度に有意な差が予測されていたので、それを捕まえるようにOREXの静電プローブの計測レンジが設定された経緯がある。従って、2温度モデルとフライトデータの高々度での不一致は、期待に反したものと言わざるを得ない。計算の問題として当面以下のことが考えられる:

- N_2^+ 、 O_2^+ 、 N^+ 、 O^+ のイオンは考慮していない;
- 希薄気体の効果を見逃している;
- 壁温度を1500Kで固定している;
- 標準大気を仮定している。

これは今後検討を要する問題である。

6. おわりに

OREX がわが国で初めての再突入実験機であったことを考えると静電プローブによる電子密度計測実験は満足のいくものであったと考えられる。得られた電子密度の値も CFD の予測の範囲内であった。しかし壁近傍での電子密度が飛行途中で減少するなど、原因不明の現象も生じている。さらに、高い高度でフライトデータの電子密度が、2 温度モデルよりも 1 温度モデルの計算結果に近いという、予想に反した結果が得られているのも問題であろう。壁条件、格子、飛行経路/大気データ、反応モデルが計算結果に与える影響をまずチェックする必要がある。しかしこれらの問題は、同時に我々の高温気体の物理現象に対する理解が不十分であることを示唆しているように思われる。

References

- [1] Inoue, Y., Watanabe, Y., Wada, Y., Akimoto, T. and Yasui, H., "Some Aerodynamic Measurement Results of the Orbital Reentry Experiment (OREX)," ISTS-94-d-24, May, 1994.
- [2] Wada, Y., Ogawa, S and Kubota, H., "On the Thermo-Chemical Models for Hypersonic Flows," 4th ISCFD, Davis, 1991, pp.719-728, also in *Computers and Fluids*, vol.22, 1993, pp.179-187.
- [3] Jones, W.L. and Cross, A.E., "Electrostatic-Probe Measurements of Plasma Parameters for Two Reentry Flight Experiments at 25000 feet per second," NASA TN D-6617, 1972.
- [4] Chen, F.F., *Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 1: Plasma Physics*, Plenum Press, 1983.
- [5] Park, C., "Assessment of a Two-Temperature Kinetic Model for Dissociating and Weakly Ionizing Nitrogen," *AIAA Journal of Thermophysics*, vol.2, 1988, pp.8-16.