

# リフレクトメータによる機体まわりのプラズマ電子密度測定

航空宇宙技術研究所 ○伊藤 健 高木亮治  
宇宙開発事業団 寺岡 謙

極超音速での飛行中には機体まわりの気体が電解離してプラズマ状態になることが知られている。このため、プラズマ層によって電波が反射されブラックアウト現象が生じ、また、温度や圧力が気体の電解離を仮定しない場合の予測からはずれずれる。ところが、この種のデータは地上試験で得ることが困難であり、今回の HYFLEX 飛行試験はこの種のデータを取得できる貴重な機会である。HYFLEX では、機体まわりで生じる気体の電離現象を、リフレクトメータによって機上から測定した。取得したデータは、電波の反射強度及び位相の変化である。一方、飛行試験結果と比較するため、実在気体 CFD コードを用いた数値解析によってプラズマ密度場を計算し、この結果を用いて電波反射解析を行った。飛行試験結果と数値計算結果はよく一致し、実在気体 CFD コードの結果を、プラズマ電子密度に換算して二倍程度の誤差で検証することができた。今後、電波反射解析手法の検討などにより、さらに検証精度を上げる必要があるが、本飛行試験データは、機体まわりのプラズマ電子密度場の基礎データとして、また、CFD および電波反射解析手法の検証データとして非常に有用であった。

## Measurement of Plasma Electron Density around HYFLEX Vehicle

National Aerospace Laboratory Takeshi Ito, Ryoji Takaki  
National Space Development Agency Ken Teraoka

It is known to become a plasma state by electrolyzing the gas around the vehicle under hypersonic speed flight. Therefore, the radio wave is reflected by the plasma layer, and the blackout phenomena occurs. In the other, it is also reported that temperature, pressure and density around the vehicle deviates from the prediction which do not assume electrolyzing of the gas. Although it is difficult to obtain the such kind of data in the ground test, present HYFLEX plan is the precious opportunity which can acquire the data of plasma state around the vehicle. In HYFLEX, it was planned that the ionizing phenomena of the gas around the airframe was measured by the reflectometer from the onboard, and the data acquisition was done. Acquired data is the change of reflection intensity and phase of the radio wave. In the meantime, the plasma density field was calculated using the real gas CFD code and the radio wave reflection analysis was carried out in order to compare with the flight test. Flight test result and numerical calculation result agreed well, and the real gas CFD code was verified at an error of about two times by the conversion to the plasma electron density. Although the verification accuracy has to be raised more by examination of the radio wave reflection analysis technique, etc., this flight test data was very useful as basic data of plasma electron density field around hypersonic flight vehicle, and as verification data of real gas CFD code and the radio wave reflection analysis technique.

## 1. はじめに

アポロやスペースシャトル等が大気圏外からの帰還する時に、地上との電波通信が途絶えるブラックアウトと呼ばれる現象が生じる。これは、大気中を極超音速で飛行するために、機体回りで空気が電離してプラズマ状態になり、電波を反射してしまうために起こる。また、スペースシャトルの初期の飛行では、空気の電離によって機体の温度や圧力が、電離を仮定しない場合の予測から大きくはずれ、機体の空力特性に影響を及ぼす結果が得られている。これらのプラズマ状態についてのデータは、極超音速飛行を行うためには必要不可欠なものである。ところが、極超音速流が機体におつかつて電離して生じるプラズマ状態は、地上試験で得ることが困難であり、今回のHYFLEX計画はこの種のデータを取得できる数少ない機会である。

HYFLEXでは、ブラックアウト時に機体まわりで生じる気体の電離現象を、リフレクトメータによって機上から測定することを計画し、データ取得を行った。HYFLEXの機体まわりのプラズマ密度は飛行速度、大気密度の変化に伴って変わる。このプラズマ層による電波の反射強度及び位相の時間履歴を機上から測定し、実験機の飛行速度、高度の変化に伴う機体回りのプラズマ電子密度の変化を求める。また、実在気体CFDコード（気体の電離、再結合を含む流れ場の数値計算）による数値解析からプラズマ密度場をもとめ、その結果を用いて電波反射率を計算する。この結果と飛行試験結果との比較によりCFDの検証を行う。

## 2. リフレクトメータの設計

機体回りに発生するプラズマ密度の予

測をCFD等によって行い、電波の反射を得るための適当な周波数を設定しなくてはならない。後述するように、予測されるプラズマの密度は、プラズマ周波数に換算して2~4GHz程度であり、リフレクトメータに用いる周波数は1GHz以下を使うことが望ましい。一方、機体搭載のためにアンテナの大きさには制約があり、タイル一枚分に相当する300mm $\phi$ 程度以下の開口部に収める必要があるため、周波数の下限が存在する。これらの制約から、800~900MHz程度の波長を用いることとした。また、電波のカットオフのタイミングの違いを調べるため、この2倍程度の周波数も併せて測定する。最終的に採用された電波の周波数は、無線局免許の取得に関わる制約などから決まり、902.85MHzおよび1676.5MHzとなった。測定位置は、高いプラズマ密度を測定するため、アンテナは出来る限り機体前方に設置する必要がある。一方で、高温にさらされる危険性を避けるため、C/Cノーズキャップのすぐ後方、ノーズから960mm、中心線から横方向に180mmの位置にアンテナを設置した(Fig.1)。測定項目は、反射強度については両周波数で、反射位相の変化については902.85MHzで測定を行う。また、これらのほかにリフレクトメータ本体温度、二次電圧を測定し、測定機器の動作確認、及び動作環境のモニターを行った。

アンテナは矩形導波管型のアンテナを用いる。Fig.2は902.85MHzのアンテナである。開口部は902.85MHzでは135mm $\times$ 267mm、1676.5MHzでは74mm $\times$ 145mmである。この開口部をアルミ構造に開けたときの構造強度を確保するため、ケブラー製の電波透過パネルの窓を通して電波を放出する。また、電波は耐熱タイルを通じて放出される。電波透過パネル及

び耐熱タイルの電波の透過性は良く、その影響は小さい。

測定回路系は、発振部、サーキュレータ、SWR計（902.85MHzのみ）、検波部および増幅部から構成される（Fig.3）。サーキュレータは磁力線を利用し、電磁波を低損失で発振部からアンテナへ伝送し、また、アンテナからの反射波を検波部へ伝送する。検波部で反射電波を検波し、強度の変化を測定する。SWR計は誘電率約2.2のストリップ線路と、これと電磁結合されたピックアッププローブから構成される。プローブは波長換算で約45度間隔に配置され、そこに生じる定在波を捉えることによって反射電波の位相の変化を測定する。ただし、位相測定結果については、データ処理のための数値解析を進めている最中であり、本報告では触れていない。

最後に、リフレクトメータの測定系の動作確認と、校正データの取得を目的として、実機搭載機器を用いて金属板による電波反射測定を行った結果について述べる。実機と同形状の半胴模型にアンテナを取り付け、実機同等品の耐熱タイル及びアンテナウインドウを通して電波を放出し、アンテナ前方に置かれた十分大きな金属板による反射を測定した。金属板と耐熱タイル表面との距離の変化に伴う反射率の変化を Fig.4 に示す。金属板がタイルから離れるに従い、電波反射率が低下している。半波長ごとにピークがみられるが、これは、タイルと金属板の間に定在波が生じることによる反射率の増大と考えられる。

### 3. CFDによるプラズマ密度解析

HYFLEXの飛行経路に沿った高度、飛行速度の変化に伴う機体回りのプラズマ

電子密度場を、実在気体効果を含むCFD解析によって計算した。流れ場は三次元定常流れで、粘性、圧縮性の混合気体を考えている。また、非平衡効果として、内部エネルギーの振動温度と有限速度の化学反応を考慮に入れた。これらにより、支配方程式は三次元非定常完全Navier-Stokes方程式に各化学種の質量保存式、振動エネルギーの保存式が加わったものになる。

Fig.5に示した密度分布は、HYFLEXに搭載されるリフレクトメータのアンテナ中心位置での計算結果である。得られたプラズマ層は数センチ程度、最大密度はプラズマ周波数に換算して2～4GHz程度であった。密度分布は分離後114秒までは壁面がもっとも高いが、これ以降は壁面から約3mmの位置にピークを持つ分布となる。壁面から3mm位置での最大密度は、分離後120秒で生じている。壁面近くでの分布の不連続が格子1つ分の範囲で生じているが、この原因については現在調査中である。なお、壁面上での最大密度は分離後116秒で生じている。なお、次項以下の電波反射解析では格子の関係で壁面での電子密度は使っていない。プラズマ層の厚さがリフレクトメータの電波の波長（10cm～30cm）に比べて比較的薄いため、プラズマ密度がカットオフ周波数以上になっても、電波がプラズマ中にしみ込む現象によって全反射しない可能性があり、以下の項で述べる電波反射解析が必要となる。

### 4. 電波反射の数値解析

プラズマに対する電磁波のカットオフを検知し、電波が透過すればカットオフ周波数よりプラズマ密度の方が小さく、電波が反射されればプラズマ密度の方が

大きいことを利用して、プラズマ密度を決定できる。しかし、プラズマ層が密度分布を持ち、有限な厚さの場合には、反射率が0と1の間をとる。このため、電波反射率とプラズマ密度の関係を求めるために、マクスウェル方程式とプラズマ粒子の運動方程式の数値解析を行った。離散化は時間および空間の両方について中心差分を用い、電場と磁場は、空間上および時間上で互い違いの格子で計算している。また、プラズマを表現するため、実際のプラズマ粒子を集団的に表現し、空間的な広がりを持つ「超粒子」を用いている。粒子の衝突は考慮していない。計算格子は902.85MHzで約3mm、1676.5MHzで約1.5mmである。

プラズマ反射解析に先立って、プラズマなしの条件で金属板反射を模擬した計算を行った。金属板までの距離は、アンテナからタイルおよびアンテナウインドウの厚さ分の距離を引いたものである。結果をFig.4に重ねて示した。一次元では、距離の変化に関わらずすべての電波がはね返される。一方、二次元および三次元では横方向への電波の漏れによって、反射率が減少する。三次元解析結果は実験と定量的によく一致した。ただし、三次元のプラズマ電波反射解析コードが開発中のため、プラズマによる反射解析では二次元の計算コードを用いる。このため、二次元の計算結果を三次元補正する必要がある。ここでは、図に示したように単純な算術式( $f = 0.6 \times x^{1.6}$ )を用いた補正を行った。

## 5. 飛行試験結果および考察

飛行試験結果をFig.6に示す。得られた反射率の最大値は902.85MHzでは約0.3、1676.5MHzでは約0.2程度であった。電波

の周波数が低いほどプラズマ層による反射が大きくなるとされていることから、この結果は定性的に正しいものといえる。また、電波反射は分離後秒時で約100秒から130秒まで生じているが、これは、HYFLEX飛行中のVHFで観測されたブラックアウト(105秒~125秒)とよく一致している。

次にCFDによって求めたプラズマ電子密度を用い、プラズマによる電波反射の数値解析を行った。反射率の最大値は、どちらの周波数においても計算の方が多少大きめの結果が得られている。ただし、三次元補正の精度が低いため、反射率で0.1程度の誤差は存在する可能性があり、その誤差範囲でおおむね一致した結果といえる。反射率で0.1の誤差は、プラズマ密度では最大で2倍程度の差になり得ることから、今回示した解析結果は、実在気体CFDコードによる計算結果がプラズマ電子密度で約2倍以内の誤差で検証されたものといえる。今後、電波反射解析の三次元コードの開発をすすめることにより、さらに精度の良い検証を行っていく。一方、反射率最大の生じる時刻に着目すると、計算結果は飛行試験結果と約5秒ほどずれている。これは、壁面から3mmの距離における最大密度の時刻が飛行試験での最大反射の得られた時刻とずれていることによる。解析で無視した壁面上の密度の最大値が116秒で得られていることから、この値が正しい結果である可能性もあり、今後のCFDおよび電波反射解析の検証データとして考慮していく必要がある。

## 6. まとめ

HYFLEXにおいて、極超音速飛行時に機体まわりに生じるプラズマ電子密度を

調べるため、電波の反射をリフレクトメータによって測定した。測定結果は、数値解析結果とよく一致し、CFDの妥当性をプラズマ電子密度で二倍程度の誤差で検証する事ができた。今後、電波反射解析手法の検討により、さらに精度良く検証していく。一方、CFDでの壁面上のプラズマ密度分布の問題や、最大反射率の発生時刻のずれについては、CFDや電波反射解析手法の検証データとして参考にし、原因を探っていく。以上のように、

本飛行試験により、地上試験での取得な困難なデータが得られ、その結果は実在気体CFDコードおよび電波反射解析手法の検証データとして非常に有用であった。

参考文献 1) 伊藤, 高木, 寺岡; 第37回宇宙科学技術連合講演会、1993年10月; 2) 伊藤, 高木, 白水, 寺岡, 渡辺; 平成5年度スペースプラズマ研究会、1994年3月; 3) 伊藤, 寺岡, 中村; 日本航空宇宙学会第26期年会、1994年4月; 4) 高木; 第12回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, NALSP-26, 1994年12月; 4) 高木, 伊藤; 第14回航空機計算空気力学シンポジウム、1996年6月

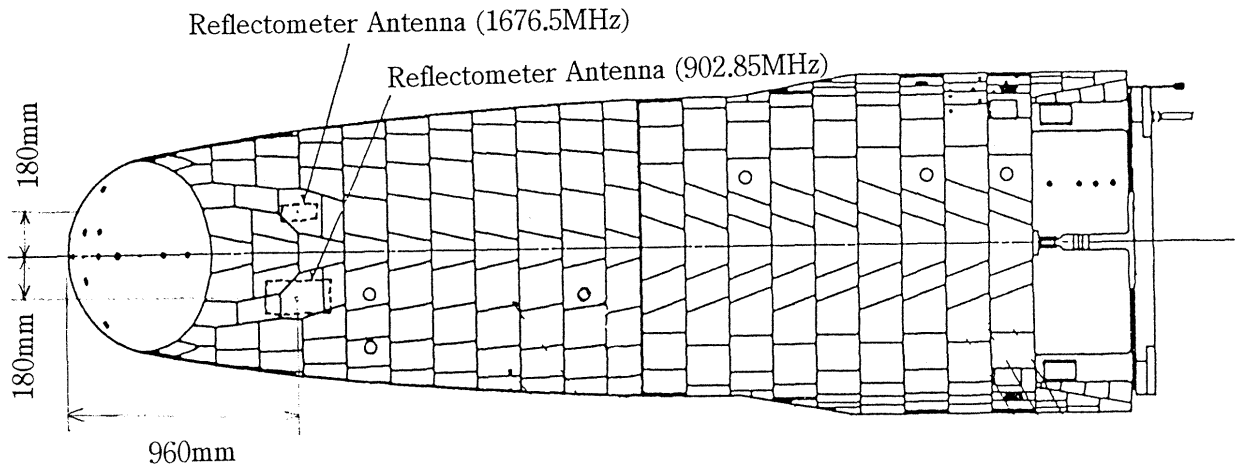


Fig.1 Installation position of reflectometer antenna.

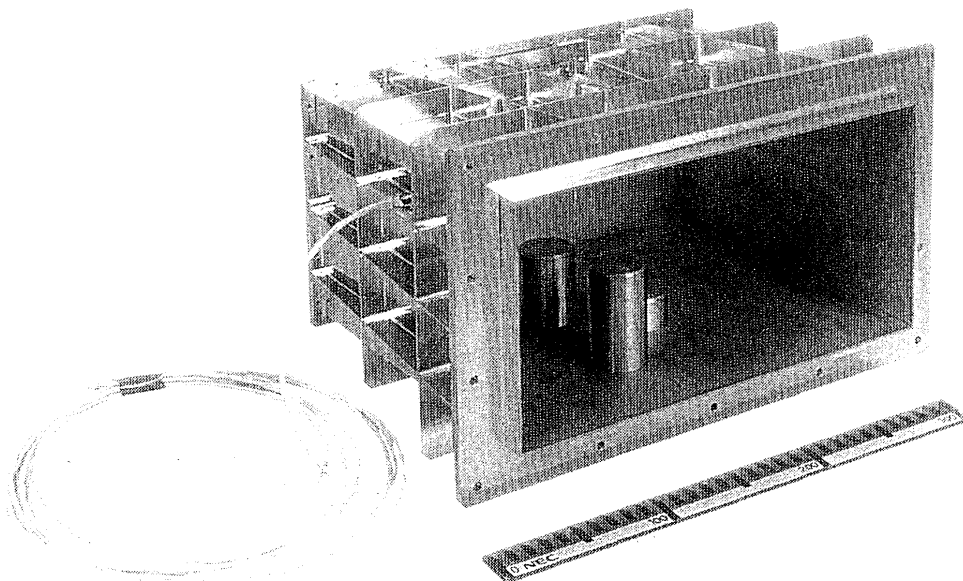


Fig.2 Reflectometer Antenna (902.85MHz).

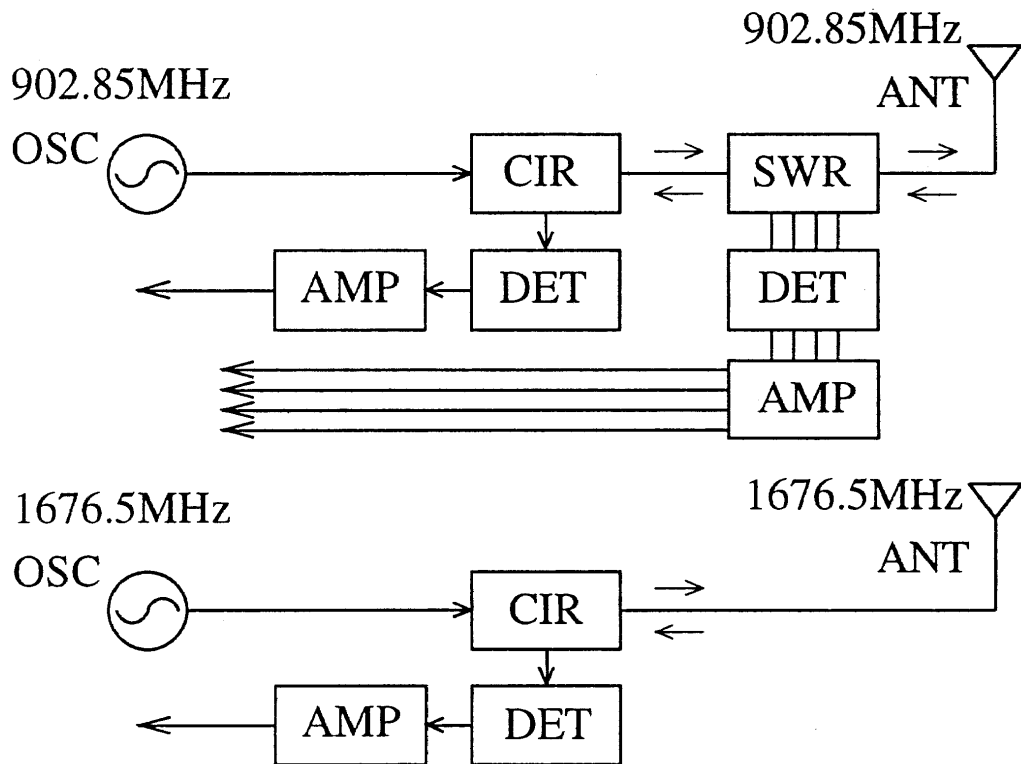


Fig.3 Circuit Diagram of the Reflectometer.

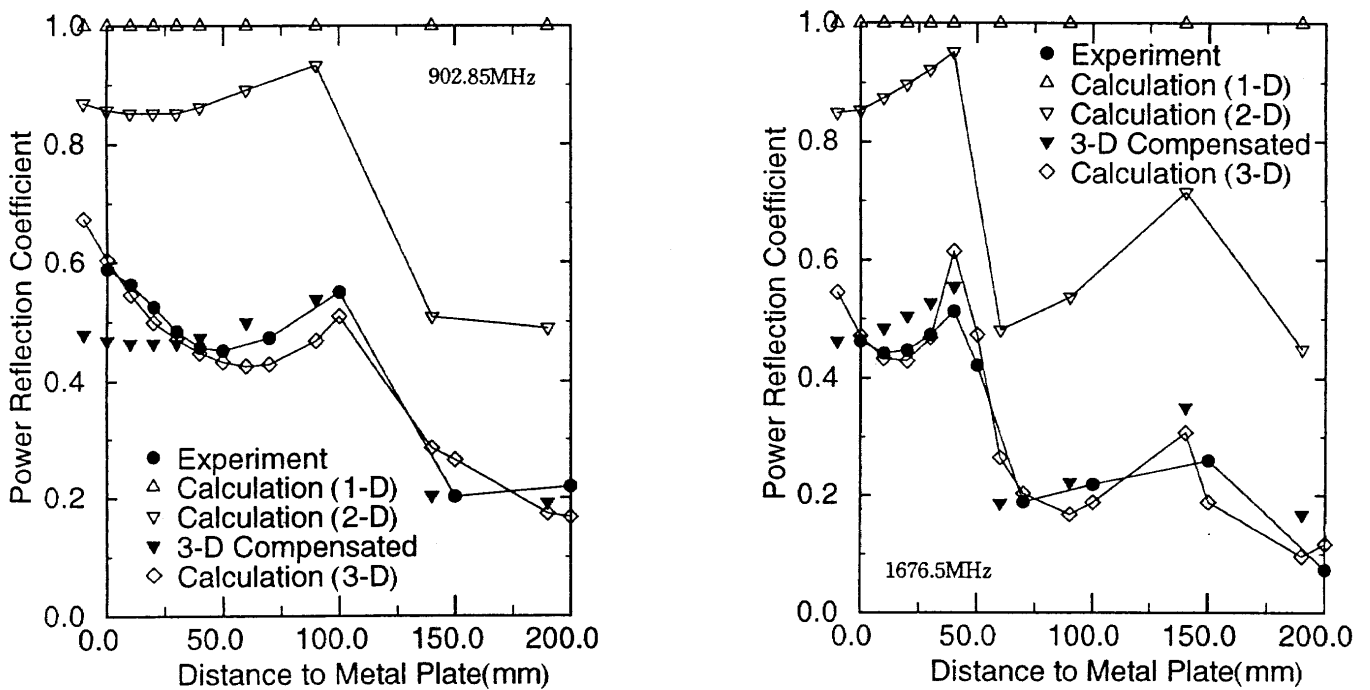


Fig.4 Calibration Test Result by the metal plate Reflection and Radio Wave Reflection Analysis Result.

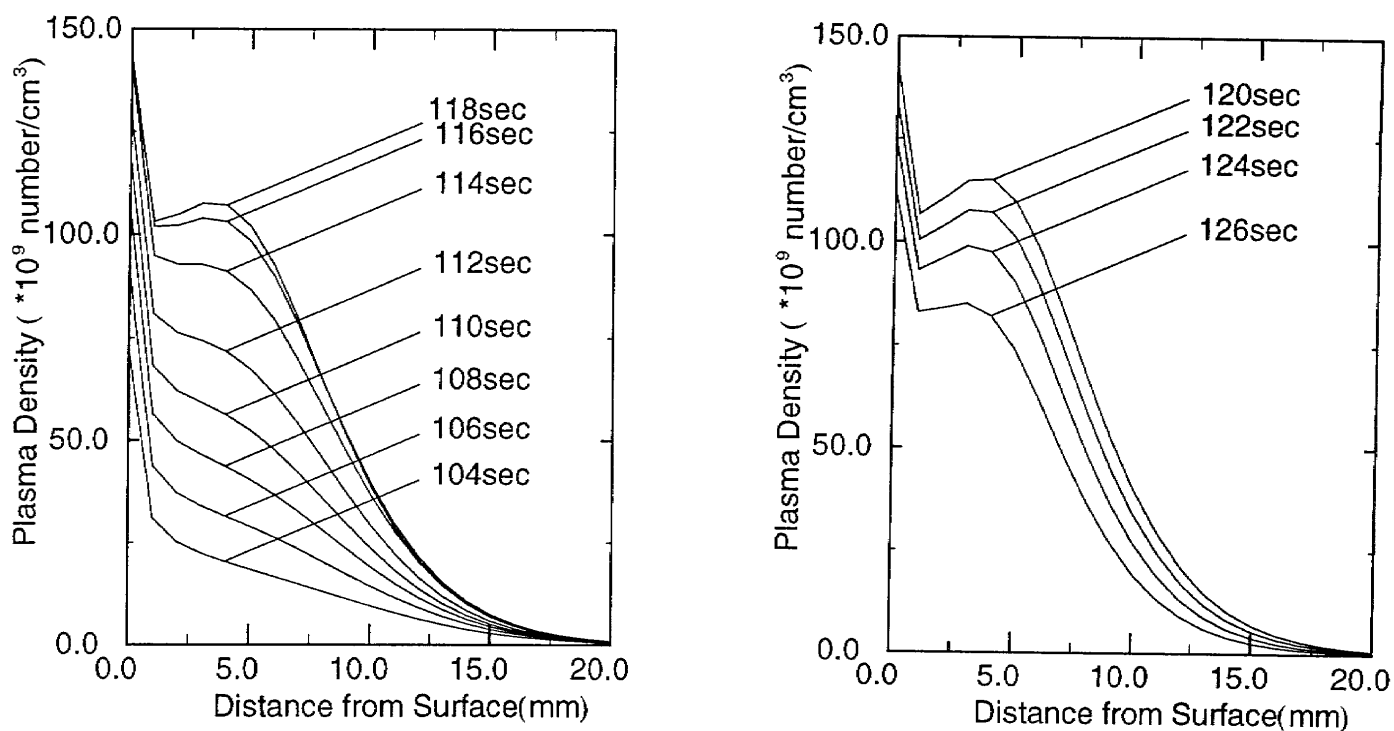


Fig.5 Calculation Result of the Plasma Electron Density by the Real Gas CFD Analysis

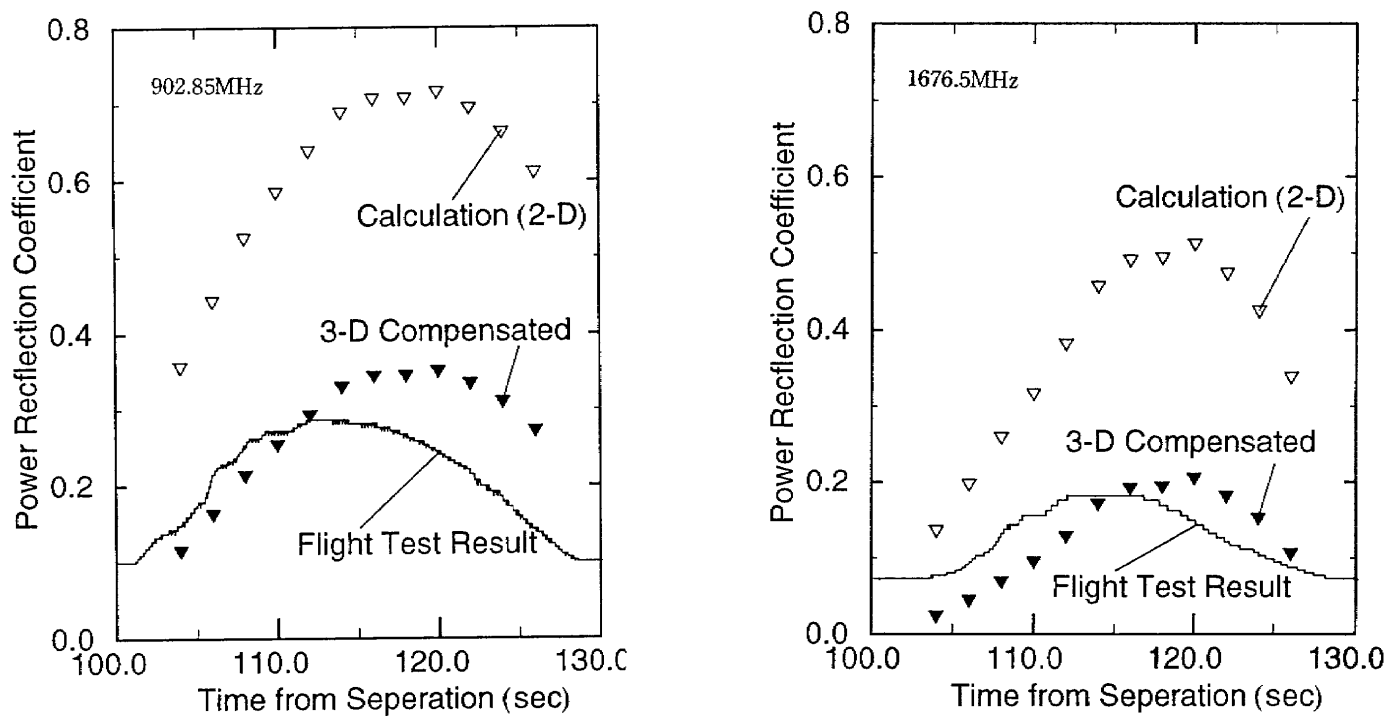


Fig.6 Flight Test Result of the Radio Wave Reflection Measurement by the Reflectometer and Numerical Analysis Result