

2C03 マイクロ波干渉計の高空間分解能化と衝撃波前方の プリカーサー電子数密度計測

○嶋村耕平，村松武明（東京都立大学）

Microwave Interferometric Measurement of Precursor Electron Density
Kohei Shimamura and Takeaki Muramatsu (Tokyo Metropolitan University)

Key Words : Microwave interferometry, Hypersonic flow, Precursor ionization, Expansion tube

Abstract

In hypersonic atmospheric entry scenarios such as asteroid sample return missions, strong shock waves lead to the formation of high-enthalpy, nonequilibrium plasma flows. A notable phenomenon in such environments is the generation of precursor electrons—plasma appearing ahead of the shock front due to radiative ionization. Conventional thermochemical models, such as Park’s model, often fail to account for this effect, leading to underprediction of heat fluxes. To accurately measure the electron number density in the precursor region, this study developed a millimeter-wave interferometer utilizing an IQ mixer to improve spatial resolution in free-space transmission diagnostics. A 28 GHz signal was selected to detect plasma with cutoff densities suitable for precursor detection. Experiments were conducted using a 9-meter free-piston expansion tube with argon as the test gas, achieving shock speeds around 6 km/s.

1. 序 論

1.1 研究背景 大気圏再突入時のような極超音速環境では非常に強い衝撃波が形成され，空気が電離や解離といった化学反応を起こす．非平衡熱力学と熱輻射がプラズマ中で発生する．サンプルリターンミッション行う人工衛星ではこのようなプラズマによって熱流束が増加するという問題がある．そのため強い衝撃波により発生するプラズマ現象を理解するのは非常に重要である．

強い衝撃波によって発生するプラズマ現象の一つにプリカーサー電子がある．プリカーサー現象は衝撃波層内からの輻射によって衝撃波前方でプラズマが発生する現象である．既存の熱化学モデルとして一般的なParkのモデルではこのプリカーサー電子を考慮されていないため，実験値と数値計算との間に大きな解離がある．プリカーサーの存在によって熱流束が既存の数値計算による予測より10 %ほど増加することが報告されている¹⁾．プリカーサー電子を地上で生成することができる装置に膨張波管²⁾がある．膨張波管では高いエンタルピーの気流を作ることができる．

1.2 研究目的 既存の衝撃波管で非接触にプリカーサー電子数密度を計測するためにはマイクロ波を用いた自由空間透過法が必要である．従来のマイクロ波干渉計では計測間隔が0.5 m程度であった．送信信号にミリ波、位相計測にIQ Mixerを用いることで，瞬時の位相情報を計測することができ，より高解像度でプリカーサー電子数密度を計測することができる．そこで本研究では、

IQ Mixerを用いたミリ波干渉計を開発し、自由空間透過法によってプリカーサー電子数密度を計測することを目的とする．まずプリカーサー電子数密度を計測可能なミリ波干渉計の発信周波数を決定し，干渉計構成部品の選定を行う．つぎに，膨張波管によってプリカーサーを生成しミリ波干渉計で計測を行う．干渉計の計測結果と比較するためにトリプルプローブ計測も同様にを行う．

2. 実 験 装 置

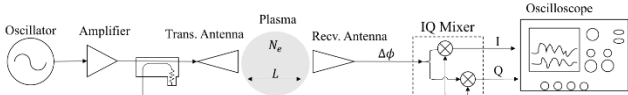
2.1 9m自由ピストン式膨張波管 実験に使用した膨張波管は全長9 mの自由ピストン式二段膨張波管である．最大で8 km/s程度の衝撃波を生成することができる．運転条件を変更することで衝撃波速度を調整することができる．実験条件として第二隔膜は取り付けずに初期圧40 Paのアルゴンを試験気体とした．得られる衝撃波速度は6 km/s程度である．

2.2 トリプルプローブ法 トリプルプローブ法はプローブを用いた電子数密度計測手法のひとつである．3本の金属製のプローブを近接して配置し，その内の2本に電圧を印可する．プローブをプラズマに挿入するとプローブに電流が流れることを利用して計測を行う．トリプルプローブ法は時間分解能が良いという特徴がある．イオン温度を仮定する必要がある，原理上の誤差が70%程度あるといわれている³⁾．

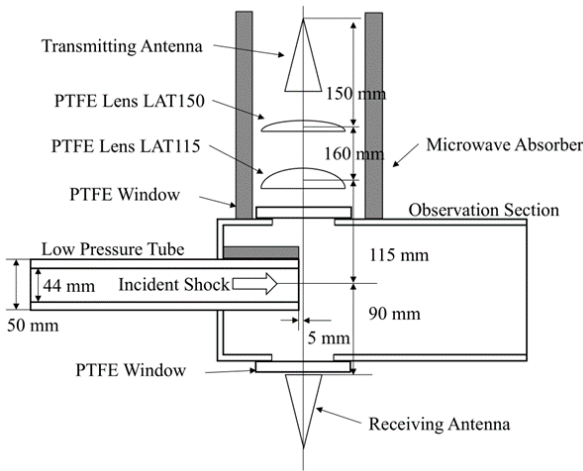
2.3 マイクロ波干渉計 マイクロ波干渉計はプリカーサー電子の計測に適している．マイクロ波干渉計は発信器で発信した電波を二方向に分岐し，片方をブ

ラズマに通し、もう片方をプラズマに通らないようにする。プラズマを通過すると二つの経路で位相差が生じることから電子数密度を計測する。干渉計の発信周波数は28 GHzとした。28 GHzのマイクロ波のカットオフ電子数密度は $9.7 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ である。

マイクロ波干渉計はプローブ計測に比べて空間解像度が悪いという欠点がある。本研究ではマイクロ波干渉計のビームを誘電体レンズによって集光することで空間分解能を改善した。集光直径を計測するため集光位置にマイクロ波吸収材を設置し、吸収剤の温度上昇をIRカメラ (Teledyne FLIR, LLC. T860)によって計測した。図1に計測した温度分布を示す。図中にはピーク温度の1/e2となる温度を示している。この計測結果から集光直径は30.7 mmと得られた。図2は干渉計を膨張波管観測部へ取り付けた様子である。



第 1 図 マイクロ波吸収材の温度上昇

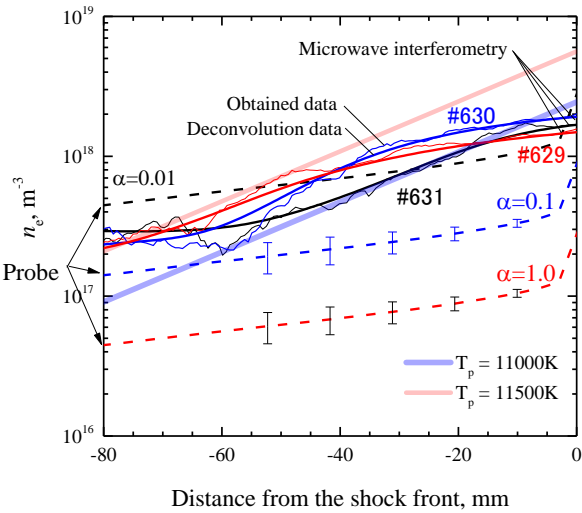


第 2 図 マイクロ波干渉計のセットアップ

3. 実験結果及び考察

図3はトリプルプローブ計測結果, およびの干渉計計測結果である。トリプルプローブ計測の衝撃波速度は6.64 km/s, 6.58 km/s, 6.68 km/sでありノイズによる影響を抑えるため計測電圧に5マイクロ秒の移動平均を用いた。マイクロ波干渉計計測の衝撃波速度は6.25 km/s, 6.58 km/s, 6.57 km/sである。マイクロ波干渉計のdeconvolution processにはWiener filterを用いている。

これはビーム直径30mmに対して現象が100mm前後の precursor layerを捉える上で空間解像度の低下、信号の鈍化を回復することを狙ったのである。また藤田らの解析解を用いて precursor layerについて電子数密度のつもりをおなっている。まずプローブについては電離度を仮定する都合により電子数密度は、衝撃波前方100mm程度で 1×10^{17} から $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 程度と見積幅が大きい。次に干渉計の実験では3回の結果がおおよそ電離度0.01のプローブで仮定した結果と一致している。また藤田らの解析解を用いると平衡温度11000K程度であり、これはNASA CEAの見積と概ね一致することが分かった。



第3図 電子数密度計測結果

4. 結 論

本研究では非接触でプリカーサ計測行うために、ミリ波干渉計を構築した。発振周波数に28 GHzのミリ波、位相計測にIQ Mixerを用いることで従来の自由空間透過法よりも高い空間分解能でプリカーサ計測を行った。トリプルプローブの原理上の誤差が70%であることと計算に仮定を用いていることから干渉計によってトリプルプローブよりも精度よく計測できたと考えられる。

参 考 文 献

1) C. O. Johnson, A. Mazaheri, P. Gnoffo, B. Kleb, Assessment of Relative Heating Uncertainty for Hyperbolic Earth Entry, 42nd AIAA Thermophysics Conference Papor, Vol. 5, No.1, 1967.

2) D. E. Gildfind, C. M. James, P. Toniato, R. G. Morgan, Performance considerations for expansion tube operation with a shock-heated secondary

driver, Journal of Fluid Mechanism vol. 777, pp. 364-407. (2015)

- 3) 堤井信力, プラズマ基礎工学 増強版, 内田老鶴圃 (1995)
- 4) Fujita, K., Sato, S., Abe, T., and Matsuda, A., "Electron Temperature and Density Measurement Ahead of Strong Shock Waves," 35th AIAA Thermophysics Conference, AIAA Paper 2001-2765, 2001.
- 5) G. Yamada., Generation mechanism of precursor electrons ahead of a hypersonic shock wave in argon. Journal of Fluid Science and Technology. Vol.9, No.5, (2014) DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0070