

## 論文内容の要旨

論文題目 **Experimental Investigation of Nonequilibrium Phenomena in the Shock Layer of Reentry Capsule with Super-orbital Velocity**  
(超軌道速度再突入カプセル衝撃層内非平衡現象に関する実験的研究)

氏名 松田 淳

2003年5月打ち上げに成功した小惑星探査衛星「はやぶさ」は、宇宙科学研究所（現、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部）が1990年代中頃から MUSES-C 計画として開発を進めてきたものであった。本計画は、小惑星の岩石サンプルを地球に持ち帰る、いわゆるサンプルリターンミッションであり、本計画を契機として、様々な工学技術の開発が行われた。中でも、最も空気力学的関心を集めたものが、本ミッションの最終段階で行われる地球大気への再突入の際に予定されている惑星間軌道からの直接再突入である。この直接再突入の採用は、地球周回軌道を経ないため、軌道変更に必要な推進材を省略でき、再突入システムの簡素化、軽量化に繋がると考えられたためである。従来のスペースシャトル等の再突入ミッションでは、地球周回軌道からの再突入を行っており、その再突入速度は秒速8 km程度であったが、MUSES-C 計画で予定しているような直接再突入の場合、その速度は秒速12 km程度の高速度に及ぶと予測されている。

秒速12 km程度での再突入においては、再突入カプセル前方に強い衝撃波が発生し、その衝撃層内（衝撃波とカプセル表面の間の領域）では、気体分子の解離、電離、輻射等、複雑な熱化学非平衡現象が発生すると考えられる。このような高速飛行環境下で発生する非平衡な衝撃層内でのカプセル表面への空力加熱として、対流加熱のみならず輻射加熱も多大な寄与を示す事が指摘されて来た。

空力加熱量の予測には、地上設備を用いて飛行環境を実現することが困難なため、数値解析が用いられる。再突入飛行環境で発生する熱化学非平衡現象を再現するモデルとして、Park の二温度モデルが良く用いられる。しかし、このモデルは、地球周回軌道からの再突入環境を模擬するために構築されたものであるため、惑星間軌道からの直接再突入環境をどれほど正確に再現できるかについては、疑問の余地がある。また、これまでの研究から、空力加熱のうち特に輻射加熱量の予測値について、熱化学モデルに含まれる経験的パラメーターに対して敏感であるということが知られている。一方、秒速12 km程度の高速飛行環境で発生する衝撃波背後の熱化学非平衡現象について十分な理解は得られていないのが現状であり、また、実験データもそれほど蓄積されていないため、既存の熱化学モデルの MUSES-C 再突入速度クラス（秒速12 km）への適用可否についての実験結果との比較による検証はほとんどなされていない。このため、実際の再

突入カプセルの設計には、予測される加熱量に対して、マージンを加味することで対応せざるを得ないのが現状である。しかし、この手法は将来の惑星探査ミッションにおける惑星大気直接再突入カプセルの開発におけるボトルネックとなることが危惧される。そこで、この問題を解決するために、これまで、宇宙科学研究本部では、純粋窒素を試験気体として、衝撃波管を用いた実験が行われて来た。純粋窒素を試験気体とした理由は、現象の理解の簡単化のためである。その結果、衝撃波背後での回転、振動温度、電子励起温度、電子密度等の分布が得られ、既存の熱化学モデルの問題点が指摘されてきた。

しかし、実際の再突入カプセルは、地球大気への突入となるため、次の段階として、空気（窒素、酸素混合気体）中で発生する衝撃波背後の熱化学非平衡現象について実験的に調べて行く必要がある。

そこで、本論文では、空気中を秒速12 km程度の高速飛行で発生する衝撃波背後の熱化学非平衡現象について調べていく事を目的とする。具体的には、以下の通りである。

- 1) 空気中で発生する衝撃波背後での  $N_2$ 、 $N_2^+$ の回転、振動温度、N 原子の電子励起温度、電子密度の挙動を調べる。
- 2) 1) で得られた結果を、以前、窒素を試験気体として得られた結果との比較を行うことで、空気と窒素の場合での結果の差異について調べる。
- 3) 衝撃波背後の領域で直接並進温度を測定し、熱化学モデルから予測される並進温度の妥当性を検討する。

目的1) は、空気中で発生する衝撃波背後の非平衡構造を調べるために必要なデータが得られると考えられるためである。

目的2) は、酸素は窒素より解離が起こり易く、酸素起因の化学種 ( $O$ 、 $O^+$ 、 $NO$  等) が熱化学非平衡現象に影響を及ぼす可能性が考えられるため、空気と窒素での実験結果の比較により、 $N_2$ 、 $N_2^+$ 、N の各物理量への酸素起因の化学種の影響を調べて行くことができると考えられるためである。

目的3) は、これまで、秒速12 km程度で伝播する衝撃波背後の並進温度分布が実験で計測されておらず、二温度モデルから予測された結果を基にのみ議論が進められてきたため、本研究成果を基に、従来行われてきた二温度モデルに基づく並進温度の予測の妥当性の検討が可能となると考えられるためである。

目的1)、2) のためには、衝撃波背後の輻射光に対して発光分光法を適用し、輻射スペクトルを取得した。スペクトルに対して、**Spectrum Fitting** 法を適用する事で、分子の回転、振動温度を、相対線強度比法で電子励起温度を、水素のバルマー線の **Stark** 効果を利用することで、電子密度を求めた。

目的3) のためには、酸素原子に対するレーザー吸収分光法を適用した。この手法の適用は、ユニークなものであるが故、次のような方策を取っている。即ち、本研究で行ったレーザー吸収分光法は、通常のアーク風洞等の気流持続時間が長い現象に対して行われる連続波長掃引による方法が困難なため、一度の実験ではレーザー波長を固定しておき、衝撃波管の駆動毎に波長を変

化させ、繰り返し何度も実験を行い、吸収スペクトル全波長域でのデータを取得する方法を用いた。各実験毎のデータのばらつきを考慮するため、二本のレーザーを用い、一本を規格化用として全実験を通して同一波長での吸収率を測定し、残りのレーザーは実験毎に波長をわずかずつ変化させ各波長での吸収率を計測した。規格化用レーザーのデータにより各波長での吸収率を規格化する事で、各実験から得られたデータを関連付けることにより吸収プロファイルを取得する方法を採った。また、衝撃波背後の状態でのスペクトル線広がりへの検討の結果は、ドップラー広がりとは Stark 広がりとの両者の寄与を考慮する必要性を示唆していた。従って、吸収スペクトルに対して、ドップラー広がりとは Stark 広がりと同時に考慮した関数形である Voigt プロファイルを適用することで、並進温度と、電子密度を算出した。ここで得られた電子密度と水素のバルマー線に基づく電子密度を比較した所、両者でオーダーが良く一致した結果が得られた。この電子密度のオーダーの一致は、酸素原子へのレーザー吸収分光による計測の妥当性を間接的に示すものであると考えられる。

実験は、自由ピストン二段膜衝撃波管を用い、衝撃波伝播速度については、①秒速 12 km と ② 10 km 又は 8 km の 2 ケースについて行った。①は惑星間軌道からの直接再突入に対応する速度であり、②は、Park の二温度モデルの適用範囲と考えられている速度域である。

発光分光及び、吸収分光実験で得られた結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) 実験で計測された並進温度は、二温度モデルによる予測結果と良く合った。このことから、二温度モデルによる並進温度の予測は妥当であると考えられる。
- 2) 発光分光により得られた空気中で発生する衝撃波背後の物理量の傾向は、以下のようである。
  2. 1)  $N_2^+$  の回転、振動温度は  $N_2$  のそれより高い。
  2. 2) 秒速 12 km、8 km の両ケース共に、回転温度は、並進温度と非平衡であり、二温度モデルと矛盾する傾向が見られた。
  2. 3) 秒速 12 km、8 km の両ケース共に、振動温度は、並進温度と非平衡であるものの、二温度モデルによる予測と合っている傾向が見られた。
  2. 4) N 原子の電子励起温度は、二温度モデルの予測よりかなり低く、計測された領域では、ほぼ、一定の温度分布を示している傾向が見られた。
  2. 5) 電子密度の挙動は、次のようであった。
    2. 5. 1) 秒速 10 km の場合、衝撃波直後での領域では、実験結果と二温度モデルによる予測は、ほぼ一致していた。
    2. 5. 2) 一方、秒速 12 km の場合は、特に、衝撃波直後での領域での実験結果と二温度モデルによる予測との著しいずれが目立った。
- 3) 2) で得られた結果と以前行われた窒素の結果について、実験を行った全速度領域において比較した。注目した波長領域での発光スペクトルの比較では、秒速 12 km の場合には、空気と窒素で両者とも  $N_2$ 、 $N_2^+$  が支配的な化学種となっており、ほぼ同様のスペクトル形状であったが、秒速 8 km の場合には、 $N_2$ 、 $N_2^+$  に加えて NO の発光がオーバーラップしたスペクトル形状となっていた。しかし、計測を行った全速度領域（秒速 12 km、10 km 又は

8 km) で、回転、振動、電子励起温度、電子密度分布の挙動が空気と窒素でかなり類似の挙動を示していることが観察された。このことから、 $N_2$  や  $N_2^+$  の温度及び、電子密度分布への酸素起因の化学種の影響は非常に小さいと考えられる。

本研究で得られた結論、2. 2) と 2. 5) は、従来広く用いられてきた Park の二温度モデルの修正の必要性を示唆する結果だと考えられる。