

1. 自由ピストン二段隔膜衝撃波管の開発

本研究では飛行環境を模擬するための実験装置である自由ピストン二段隔膜衝撃波管の開発を行った。本装置はアルミニウム合金製の $70 \times 70 \text{mm}$ の断面を有する観測部を有している。これによる不純物からの発光を低減する工夫がなされている。またターボ分子ポンプの使用により高真空まで排気が可能となっており、不純物の少ない試験環境を実現している。最初に自由ピストンの駆動条件をピストンの運動解析と第一隔膜の破膜圧力測定試験により明らかにした。次に本衝撃波管の作動特性を把握するために各部の圧力条件を変化させて観測部での衝撃波速度の依存性を調べた。そして最終的に本装置が有する性能を調べて実際の飛行環境との比較検討を行った。その結果から本装置は、惑星間軌道からの再突入として代表的な、はやぶさカプセルの再突入飛行環境を十分模擬できる性能を有していることがわかり、本研究の目的を十分達成できることを明らかにした。

2. 観測精度を向上させるための計測システム開発

衝撃波背後の熱化学的非平衡現象は衝撃波面を基準とした経時変化であるために、分光計測の際に取得したスペクトルの衝撃波面からの位置情報が正確に求めなければ現象を把握することができない。従来の研究では1本のレーザーを利用したレーザーシュリーレン法により取得したスペクトルと衝撃波面との位置関係が求められていた。しかしながら速度の計測は圧力センサーにより行われており、圧力センサーは観測部壁面に取り付けられているために、衝撃波管駆動時の振動や境界層の影響を受けやすいといった問題がある。このため本研究では2本のレーザーを利用して速度の計測と取得したスペクトルと衝撃波面との位置関係を同時に行うダブルレーザーシュリーレン計測システムを開発した。これにより速度計測とスペクトル位置の決定を非接触で行うことができ、スペクトル観測精度を大幅に向上させることに成功した。

3. 分光計測試験

3.1 衝撃波背後の温度分布の計測

従来の研究において衝撃波背後の温度分布計測が行われて2温度モデルの検証が行われてきた。これらの研究では、窒素分子の励起準位の発光スペクトルである $\text{N}_2(2+)$ バンドが計測されて、輻射解析コード SPRADIAN を用いたスペクトルフィッティング法による温度推定が行われてきた。これらの結果は特に、2温度モデルが予測する回転温度と著しく非平衡状態にあり回転緩和に関しての修正を指摘している。しかしながらこれらの実験で得られた回転温度は2温度モデルの予想値に比べて著しく低く、また $\text{N}_2(2+)$ バンドは特異な放射遷移過程を持つことが指摘されているために、気体分子の内部状態を正しく反映しているかわからない。モデルの検証をより正確行うためには基底準位状態にある内部モードを知る必要があるが、実験的に測定することが非常に困難である。そこで本研究では電子励起状態に関わる情報を取得するために、基底準位状態により近い分子スペクトルである $\text{N}_2(1+)$ バンドの計測を行い、取得したスペクトルから内部状態を求めて $\text{N}_2(2+)$ バンドから得られる計測結果との比較検討を行った。また同時に2温度モデルとの比較検討も行った。この結果から $\text{N}_2(1+)$ バンドから得られる回転温度も2温度モデルの予測値と強い非平衡状態にあることがわかった

が、 $N_2(2+)$ バンドから得られる回転温度よりも高い温度であることが明らかになった。これにより $N_2(2+)$ バンドに特異の放射遷移により、スペクトルから得られる回転温度が低く見積もられている可能性が示唆された。

また $N_2(2+)$ バンドと $N_2(1+)$ バンドの発光スペクトルに対するスペクトル解析結果から電子励起温度が振動温度と非平衡であることが示唆された。

3.2 真空紫外領域の分光計測

はやぶさカプセルの再突入時に加熱環境の解析結果から惑星間軌道からの再突入時のような再突入速度が速い場合、対流加熱に比べて放射加熱の割合も無視できなくなることが明らかになっている。またこの解析結果によると特に、放射加熱の割合の大部分は真空紫外・紫外領域の分布していることが指摘されている。このことから速度が速い再突入の場合、真空紫外・紫外領域からの加熱について調べるということが重要であることがわかった。しかしながら、この領域に分布する放射光を計測することは困難であることから、計測された例は非常に少ないのが現状である。そこで本研究では、従来困難とされてきた真空紫外領域における放射光の分光計測を新たに行った。最初に衝撃波管観測部付近において真空紫外分光計測システムの開発をいった。次に取得スペクトルの絶対強度を求めるために、真空紫外用の重水素光源を用いて計測システムの校正係数を求めた。そして真空紫外・紫外領域において、速度が速い場合と遅い場合の二つの実験条件でスペクトル計測を行い、速度の増加とともに真空紫外領域におけるスペクトル強度が強くなることが実験的に明らかになった。また真空紫外・紫外領域におけるスペクトルに対してスペクトル解析を行ったところ、電子励起温度が振動温度よりも高く非平衡であることが示唆された。この結果は $N_2(2+)$ バンドと $N_2(1+)$ バンドの発光スペクトルに対する解析結果と同じである。このために幅広い波長範囲において窒素原子線の計測を行い、実験的スペクトルから線対法により電子励起温度の評価を行った。この結果から衝撃波背後において実験で得られた電子励起温度は振動温度より高く、非平衡でありスペクトル解析結果と一致する結果が得られた。この結果はパークの2温度モデルにおいて電子励起温度と振動温度が同じであるという仮定の修正を指摘するものである。

以上を踏まえて最終的に2温度モデルに変わり、内部モードに4温度の過程を用いて衝撃波背後で振動温度よりも電子励起温度が高くなる現象を再現できるようなモデルの構築を試みた。