

令和元年6月3日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06890

研究課題名(和文) 極短時間イメージング吸収分光法による大気突入機周り流れの非平衡熱化学過程の解明

研究課題名(英文) Clarification on nonequilibrium thermochemistry around atmospheric entry vehicles using a ultra-fast imaging absorption spectroscopy

研究代表者

山田 剛治 (Yamada, Gouji)

東海大学・工学部・講師

研究者番号：90588831

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大気突入飛行する宇宙機の周りの高温流れを衝撃波管と呼ばれる地上試験装置で模擬して、流れ場の計測と特性の解明を実験的に行うものである。宇宙機の周りに生成される流れは高温のプラズマ流となるために強い発光を伴い、従来はそのプラズマ流からの発光を計測して流れの特性の解明が行われてきた。しかしながら発光の計測から得られる流れの特性は限られているために、本研究ではプラズマ流が外部の光を吸収する特性を利用した吸収分光を利用して、流れの特性を明らかにするものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来は、プラズマ流からの自発光計測より得られた情報により流れ場の特性が把握されてきた。しかしながら本手法では流れ場の断片的な情報しか把握できず、宇宙機の熱空力特性の予測精度の不確かさが大きいという問題があった。これに対して本研究では、従来と異なる手法のアプローチにより流れ場の特性を調査するものであり、高温プラズマ流の物理的な解明や将来の高精度な宇宙機開発に貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, characteristics of high temperature plasma flows around a space vehicle during entry flight were investigated using a ground testing facility called shock tube. Since high temperature plasma flows generated around a space vehicle emit strong radiation, emission spectroscopy has been conventionally applied to clarify characteristics of the flows. Information obtained by emission spectroscopy is limited. So, in this study, experimental investigation using absorption spectroscopy has been newly tried.

研究分野：非平衡熱気体力学

キーワード：分光計測 再突入飛行 熱化学的非平衡 回転温度 振動温度 衝撃波 プラズマ流

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、はやぶさミッションの成功を契機として、世界各国で様々な惑星探査ミッションが計画されている。日本でも火星を対象とした次期惑星探査や有人帰還ミッションが検討されている。このような探査ミッションでは、ペイロード比の増加や大幅なコスト削減を実現するためにエアロキャプチャを用いた惑星軌道投入など高度な極超音速空力技術の導入が計画されている。これらの空力技術を実現するためには、探査機周りの複雑な流れ場を解明し、探査機の空力特性や空力加熱率を高精度で予測できる解析モデルの開発が必要不可欠である。しかしながら現状では、探査機周りの流れ場の速度が熱的緩和過程や化学反応の速度よりも高く、強い非平衡状態にあり、熱化学過程と輻射エネルギー輸送過程の詳細が明らかになっておらず、解析モデルの飛行環境予測精度は十分とは言えない。そのため、過大な安全率を課した機体設計を余儀なくされており、システムの重量増加・開発コスト増加が問題となっている。この課題を解決するために、再突入時の衝撃層環境を衝撃波管により模擬して、要成分である N₂ や空気の熱的緩和、解離反応及び輻射エネルギー輸送過程の解明に関する研究が行われてきた。この結果、衝撃波背後の高温気流からの自発発光より得られた高温衝撃層内の熱化学過程は、解析モデルの予測結果と著しく異なることが明らかにされている。そこで解析モデル中の熱化学過程の検証・改善が必要となる。従来広く行われてきた自発発光の分光計測からは、高い電子準位に励起された粒子の情報しか得られない。一方で大気突入飛行条件では、ほとんどの粒子は基底準位か低励起準位に属し、高励起準位では分子の内部励起モードが基底準位のそれと非平衡にある可能性が考えられる。よって解析モデルの検証を適切に行い、モデルを高精度化するためには、基底準位に属する N₂ 分子の内部励起エネルギー状態を取得する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、衝撃層内の N₂ 分子の電子状態の違いに着目して、異なる電子状態から取得した N₂ 分子の熱的緩和過程の特性を明らかにして、流れ場の解析モデルの予測精度を向上させることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、自由ピストン衝撃波管により生成した高速衝撃波背後の熱化学非平衡プラズマ流の極短時間分光計測を実施する。そして取得した計測スペクトルから回転温度と振動温度をスペクトルフィッティング法により評価して、衝撃層内における熱的緩和過程を実験的に取得した。また数値解析により衝撃層内の回転温度と振動温度を計算して、計測結果との比較検証を実施した。

4. 研究成果

(1) 再突入飛行条件における衝撃層内の熱的緩和過程の解明

地球大気（試験気体に N₂ を使用）と火星大気（試験気体に CO₂-N₂ 混合気体を使用）の突入飛行条件で生成した衝撃波背後のプラズマ流の極短時間分光計測を実施して、衝撃波面を基準とする発光スペクトルの空間分布特性を取得した。これより衝撃波背後のプラズマ流中で生成される化学種の経時変化を明らかにすることができた。そして計測スペクトル中で主要な分子スペクトルに対して、スペクトルフィッティング法を適用することで回転・振動温度の空間分布特性を導出した。地球大気突入条件に関しては、計測スペクトル中の N₂ 分子の異なる電子遷移である N₂(1+)と N₂(2+)バンドスペクトルを用いて温度分布を導出した。これより異なる電子状態にある N₂ 分子の衝撃層内での熱的緩和過程の様子を取得することができた。またそれぞれの飛行条件において従来の熱化学モデルを適用した CFD コードを用いて流れ場の数値計算を行い、衝撃層内の回転温度と振動温度の緩和過程（内部エネルギーが熱平衡状態になるまでの時間変化）を取得して実験データと比較した。図 1 に地球大気突入条件における衝撃層内の N₂ 分子の回転温度と振動温度の熱的緩和過程の結果を示す。これより回転温度に関しては、C 準位の回転温度は数値解析結果より著しく低い値となり、一方 B 準位の回転温度は C 準位よりも高く、数値解析の値より少し低い値となっている。振動温度に関しては、どちらの準位もほぼ同じ値となっており数値解析と近い値となっている。これより電子準位の違いにより衝撃層内での熱的緩和過程が異なることが明らかになった。

図 2 に火星大気突入条件における衝撃層内の CN 分子の回転温度と振動温度の熱的緩和過程の結果を示す。これより、衝撃波背後 3mm から後方領域においては計測した回転温度と振動温度はほぼ同じ値となり熱的平衡状態になっていることが分かる。一方で数値解析においては非平衡領域がさらに後方まで続いている。また衝撃波前方領域に置いて、実験と数値解析結果が大きく異なっているのが確認できる。今回の実験から CN 分子の発光スペクトルが観測され、CN 分子の生成が生じることが明らかになった。この現象は過去の研究で報告されておらず、本研究における新しい発見であると考えられる。今回明らかになった衝撃波前方における CN 分子の生成過程により衝撃層内での熱的緩和過程の速度が変わるために今回みられるような数値解析との差異が生じると考えられる。今後の研究において、衝撃波前方で生じる熱化学反応過程をモデル化して数値解析モデルに組み込む必要があることが示唆された。

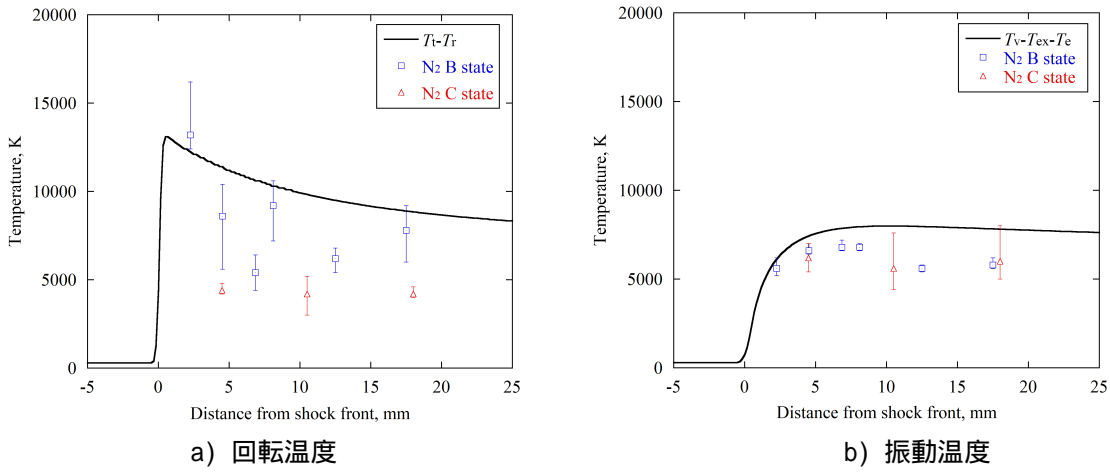


図1 衝撃層内におけるN2分子の回転温度と振動温度の空間分布

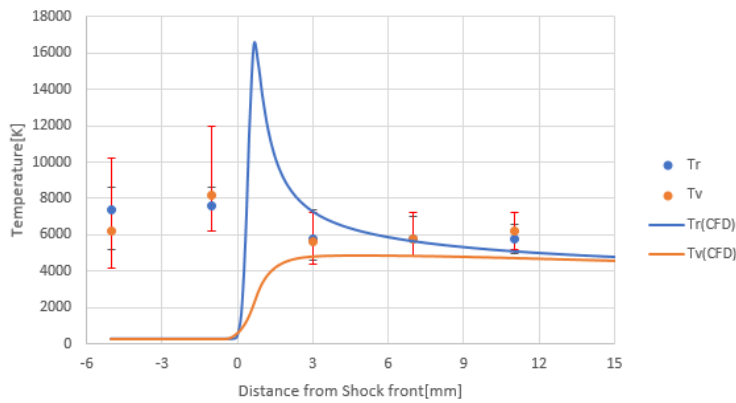


図2 衝撃層内におけるCN分子の回転温度の振動温度の空間分布

(2) 再突入飛行条件における衝撃層放射光の特性解明

地球大気突入飛行条件で衝撃波背後のプラズマ流に時間分解分光計測法を適用して、主要な発光種の単一波長における放射光の時間変化を取得した。本計測では、N₂分子、N₂⁺分子及びN原子を対象としてそれぞれの波長域における放射光の時間変化を計測した。また従来の熱化学モデルを適用したCFDコードにより、衝撃波管内の流れ場の物理量を計算して、その後放射解析コードを用いて、計測対象の波長における放射光の時間変化を数値的に再現して計測データとの比較検討を行った。図3に放射光の計測値と計算値の比較結果を示す。それぞれ衝撃波面を原点とした時間変化として示してある。これよりいずれの化学種についても、実験では衝撃波前方から発光が開始し、衝撃波面付近でピークとなりその後減少する傾向にあることが分かる。一方で計算では、衝撃波面付近で発光が開始してすぐにピークとなりその後減少する傾向にある。この結果より、衝撃波前方においてN₂の電子励起、N₂⁺の生成に係る光電離反応(N₂+hν→N₂+e⁻)およびNの生成に係る光解離反応(N₂+hν→N+N)が生じることが考えられる。また衝撃波後方領域の発光の減少に関しては、N₂の発光強度の減少は良い一致を示したが、N₂⁺とNの発光強度の減少は計算よりも実験の方が速くなっているのが分かる。これは、衝撃波前方で光化学反応が生じることにより衝撃波後方領域でのN₂⁺とNの熱化学反応過程の速度が促進されるためであると考えられる。これらの減少を解明するためには今後詳細な検討が必要である。

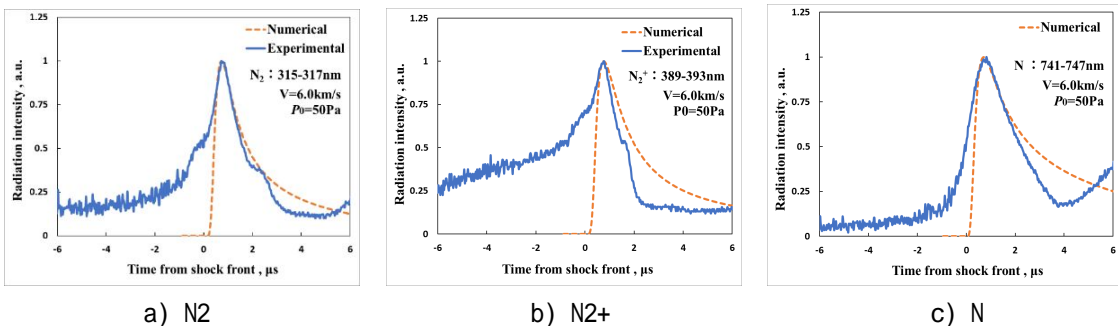


図3 衝撃層放射光の時間変化

(3) 極短時間連続吸収分光法の適用

基底準位及び低準位の N2 分子の熱的緩和過程を取得するために、キセノンフラッシュランプを光源とした極短時間イメージング吸収分光法の計測システムを構築した。図 4 に計測システムの概要図を示す。もう一方の観測窓側にフラッシュランプ光源が設置している点以外は、発光分光法の計測システムと同様である。本計測システムを用いて、発光分光計測と同じ条件で計測を行った。その結果プラズマ流通過前と通過中のスペクトルから吸収スペクトルの導出を試みたが、両スペクトルともほとんど違いがみられないために吸収量が十分でないと考えられる。そこで現在、十分な吸収量を確保するための光学計測系への改良と十分な吸収スペクトルが可能な波長領域の検討を行っている。

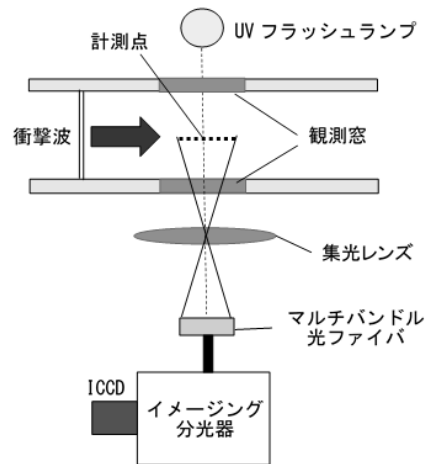


図 4 極短時間イメージング吸収分光法の計測システム

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Yamada, G., Kaise, W., Umezawa, M., “Nonequilibrium Plasma Flows in a Mars Entry Flight condition,” AIP Conference Proceedings, 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, accepted for publication, 査読あり

〔学会発表〕(計 7 件)

Kajino, M., Harada, H., Yamada, G., “Influence of Electron Excitation State on Relaxation Phenomena of Nitrogen Molecules behind Strong Shock Wave,” 15th International Conference on Flow Dynamics, 2018.

Yamada, G., Kaise, W., Umezawa, M., “Shock Tube Study of Nonequilibrium Plasma Flows in a Mars Entry Flight Condition,” 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, 2018.

Yamada, G., Kajino, M., Kawazoe, H., “Internal energy relaxation processes of nitrogen plasmas at different electronic states in an entry flight condition,” 45th EPS Conference on Plasma Physics, 2018.

Kajino, M., Yamada, G., “Analysis of the thermochemical process in the shock layer generating around space vehicles entering the Earth atmosphere,” Micro/Nano Technology Center International Symposium 2017, 2017.

Yamada, G., “Shock Layer Radiation Analysis for Spacecraft Reentry Flights,” Micro/Nano Technology Center international Symposium 2017, 2017.

Yamada, G., Yanai, S., Kajino, M., “Internal Energy Relaxation Process of Nitrogen Plasma in an Entry Flight,” The 2017 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2017.

Yamada, G., Yanai, S., “Thermochemical Process of Nonequilibrium Plasma Flows in a Mars Entry Flight Condition,” 13th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 2017.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称 :

発明者 :

権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://yamadalab.lab.u-tokai.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：川添 博光

ローマ字氏名：KAWAZOE HIROMITSU

所属研究機関名：鳥取大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：40260591

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。