

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06946

研究課題名(和文)プリカーサ現象を伴う超高速再突入飛翔体周りの非平衡プラズマ流の特性解明

研究課題名(英文) Study on non-equilibrium plasma flow characteristics with precursa phenomena around high speed re-entry ballistic bodyaround

研究代表者

川添 博光 (KAWAZOE, Hiromitsu)

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：40260591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、大気突入探査機周りに生成される衝撃波の前方領域で生じる熱化学現象や輻射輸送現象(プリカーサ現象)のメカニズムを解明することにより、大気突入飛行環境の予測精度を向上させることである。

本研究では、衝撃波管により大気突入飛行時に生成される衝撃波を模擬し、プローブ計測と発光分光計測を適用して実験的にプリカーサ現象が生じることを実証し、その特性について明らかにすることができた。またアルゴンに関して、光電離モデルを組み込んだ数値流体力学計算コードを開発して、衝撃波前方に関しては実験と良い一致を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の研究では、大気突入探査機周りに生成される衝撃層内の熱化学現象と輻射輸送現象のみに着目して研究が実施され、飛行環境の予測精度向上が行われてきた。しかしながら、本研究により、衝撃波前方領域でもプリカーサ現象が生じることが実験的にも数値的にも実証でき、それらが衝撃層内の特性に影響を及ぼすことが明らかになった。したがって、今後より多くの研究がプリカーサ現象に着目して高精度なプリカーサモデルを構築することで、大気突入飛行環境の予測精度を向上することが期待できる。

研究成果の概要(英文)： The objective of this study is to improve the prediction accuracy of atmospheric entry flight environments by characterizing the mechanism of thermochemical and radiative transfer phenomena (Precursor phenomena) occurring in the region ahead of shock waves around space vehicles.

In this study, a shock wave was generated in entry flight conditions using a shock tube. We have experimentally demonstrated precursor phenomena occur and clarify its characteristics by a probe and spectroscopic measurements. A computational fluid dynamics (CFD) code with photoionization model for Argon was developed and calculations were conducted showing a good agreement with experimental results in the region ahead of a shock wave.

研究分野：流体力学

キーワード：プリカーサ 衝撃波管 輻射光 衝撃波速度 トリプルプローブ計測 分光計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、木星トロヤ群からのサンプルリターンなど深宇宙への惑星探査が計画されている。このような探査においては、探査機を深宇宙から直接地球大気に突入する軌道（超軌道）に沿って帰還させる必要がある。その突入速度は 14km/s 以上になることが予想され、近年ミッションが成功した探査機「はやぶさ」の突入速度約 12km/s よりも速く、これまで経験のない速度域での再突入飛行が必要となる。再突入飛行時の飛行速度は音速よりも極めて速いために、機体前方に強い衝撃波が生成される。そして地球大気成分の空気は圧縮加熱されて、解離や電離を伴いプラズマ流となる。よって再突入時の宇宙機は厳しい熱空力環境にさらされる。プラズマ流中では、内部エネルギーの励起や緩和及び化学反応などが生じ、これらの熱化学過程が宇宙機に作用する空気力と加熱率に大きな影響を及ぼす。そこで宇宙機を開発するためには、機体周りで生成されるプラズマ流れの特性を解明し、飛行環境を予測することが必要となる。現在飛行環境の予測には、スペースシャトルの再突入飛行環境を対象に開発された数値解析モデルが広く用いられている。しかしながら、速い再突入飛行条件においては流れ場の特性が異なるために十分な検証・改善が必要となる。これまで国内外において、解析モデルの検証・改善を目的として衝撃波管試験が行われてきた。そして衝撃波背後の生成化学種、内部エネルギー及び輻射特性などが明らかにされた。その中で、探査機「はやぶさ」の再突入飛行時の流れ場に関する研究が行われた。これより従来計測が困難であった真空紫外領域の輻射光が計測され、計測スペクトルより得られた内部エネルギーの緩和過程（熱平衡状態への推移）が解析モデルの予測値と異なることが明らかにされた。また数値解析より、衝撃波前方の電子（プリカーサ電子）生成が解析モデルとの不一致の原因であることが分かった。この原因を解明するために、希ガスのアルゴンを対象とした予備的な研究が実施され、衝撃波背後からの輻射エネルギー輸送を原因とする光電離反応によりプリカーサ電子が生成されることが明らかになった。以上の研究からスペースシャトルよりも速い再突入飛行においては、従来の解析モデルには含まれていない衝撃波前方の熱化学過程や輻射エネルギー輸送過程（プリカーサ現象）が存在することが明らかになっているが、詳細なメカニズムについては解明されていない。

2. 研究の目的

本研究は、これまでに得られた知見を応用して研究を行い、プリカーサ現象を伴う超高速再突入飛行体周りのプラズマ流の特性を解明し、再突入飛行環境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を用いて高速衝撃波を生成し、衝撃波前方で生じるプリカーサ現象に関する実験データを取得するためにプローブ計測と分光計測を実施する。プローブ計測より衝撃波前方の電子密度と電子密度の空間分布特性を評価し、分光計測から衝撃波面付近の発光強度分布、発光化学種の同定、及び内部エネルギー状態を評価する。また数値解析により実験結果との比較検証を実施した。

4. 研究成果

(1) 衝撃波速度の高速化に向けた特性解析

自由ピストン衝撃波管で生成される衝撃波の衝撃波速度を高速化するために、ピストン駆動部の特性解析を実施した。ピストン駆動部の解析は、急開弁の圧力損失、ポリトロープ指数（熱損失を考慮）、隔膜開口時間をパラメータとして、自由ピストンの運動方程式を解くことで実施した。図1に隔膜開口時間の最大到達圧力への影響を示した解析結果の一例を示す。これより、隔膜開口時間（top）が長くなるほど最大到達圧力が高くなり急激な圧力低下が抑えられているのが分かる。開口時間は隔膜形状に依存するので、衝撃波速度の高速化には隔膜形状を変え、到達圧力を大きくすることが効果的であると考えられる。そこで、破膜時に最初に亀裂が生じる溝部の厚みは変化させずに、隔膜の開口時間に影響を及ぼすと考えられる最大厚みが異なる隔膜を用いて、圧縮管内の圧力と衝撃波速度の計測を行った。図2に得られた結果を示す。図中には最大厚み（tmax）と計測された衝撃波速度（V）も示している。これより最大厚みが増加するほど、到達圧力が高くなっているのが分かる。これは最大厚みが厚くなるほど、開口時間が長くなるためであり、図1の数値解析結果と定性的な一致を示している。しかしながら、tmax=2.6mmの時に到達圧力が最も大きくなっているが、tmax=2.3mmの時よりも衝撃波速度が小さくなっている。これは、破膜時に生成される膨張波の影響であると考えられる。開口時間が長くなるほど、破膜時に自由ピストンがより隔膜に近くなる。その結果、ピストン前面で反射した膨張波が衝撃波を減衰させる効果が大きくなるためである。以上から、本研究により衝撃波速度を向上させるためには、隔膜形状を変えることが有効であることが明らかになったが、破膜時のピストン位置に関しても考慮する必要がある。

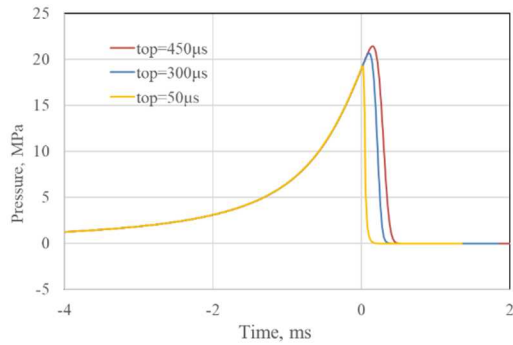


図1 隔膜開口時間の到達圧力への影響

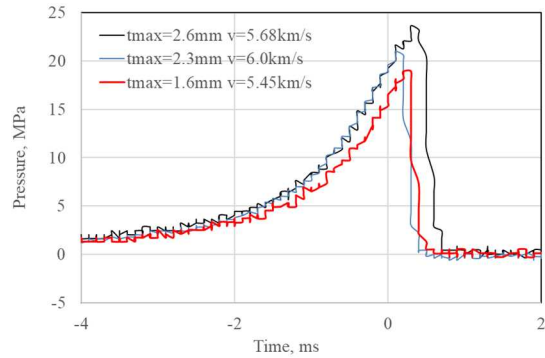


図2 隔膜形状の到達圧力への影響

(2) 衝撃波背後の極短時間分光計測と数値解析

衝撃波背後の窒素プラズマ流のイメージング分光計測を実施して、主要な発光体の化学種について特定した。そして極短時間時間分解計測システムを用いて、窒素分子と窒素分子イオンの主要なバンドヘッド及び窒素原子線を対象として、衝撃波が観測部を通過する際の発光強度の時間分解計測を実施した。また計測した主要な化学種の発光強度の時間分布を数値的に再現するために、クィーンズランド大学で開発されたCFDコードPoshax3と輻射解析コードPhotauraを用いて数値解析を実施した。本解析では、流れ場中の輻射輸送過程を考慮し、また光学的に薄い流れ場として取り扱った。なお本解析ではプリカーサ現象については考慮していない。図3に得られた結果の一例を示す。これよりいずれの発光化学種についても衝撃波前方から発光強度が増加しており、計算結果と大きく異なっているのが確認できる。これより、衝撃波前方領域で窒素分子の電子励起、光解離、及び光電離が生じていることが明らかになり、これらが衝撃層内の発光強度分布に大きな影響を及ぼすことが確認できる。以上から本研究により秒速6km程度の低再突入飛行においてもプリカーサ現象が生じて、衝撃層内の物理現象に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

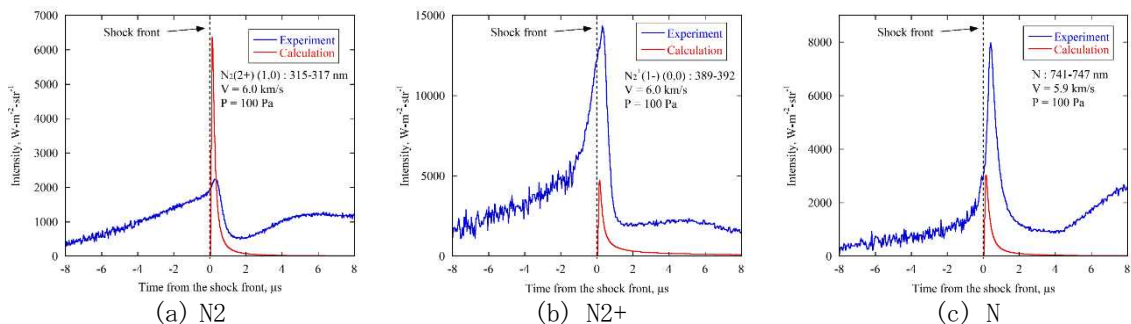


図3 各化学種の衝撃波面付近の発光強度分布特性

(3) プリカーサ現象のモデル化

図3に示したように、窒素中では衝撃波前方で複雑なプリカーサ現象が生じるためにモデル化を行うことが困難である。一方でアルゴンに関しては窒素や空気に比べて原子構造が単純であり、生じるプリカーサ現象についてもより単純であると考えられる。そこで本研究では初期段階として、アルゴンを対象にプリカーサ現象のモデル化を行った。まず、アルゴンを試験気体として行ったトリプルプローブ計測からアルゴン原子の光電離過程が衝撃波前方で生じることが明らかになっている。よって、光電離モデルを組み込んだアルゴンの1次元CFDコードを開発した。本モデルは、衝撃波背後からの輻射輸送を衝撃波面からの黒体輻射として取り扱い、衝撃波前方で光吸収により光電離のみが生じると仮定するモデルである。図4に光電離が生じる場合と生じない場合に関して計算した電子温度と電子密度の計算結果を示す。これより、衝撃波前方で光電離によりプリカーサ電子が生成されていることが確認できる。また、衝撃波背後において、温度と電子密度のプロファイルも違いが生じていることが分かる。次に本モデルを検証するために、いくつかの実験データとの比較を行った。図5にトリプルプローブ計測により取得した電子温度・電子密度の空間分布と数値解析の比較結果を示す。これより電子温度と電子密度のどちらも計算結果はトリプルプローブ計測結果と同じオーダーとなっているのが分かる。しかしながら、電子温度の計算値は一定となっているのに対して、計測値は分布を持っており、また電子

密度に関しては傾きが異なっている。これより、光電離以外の電子拡散や電子熱伝導の導入及び吸収係数の改善などが今後必要であると考えられる。図6に衝撃波背後で分光計測より得られた電子温度・電子密度の空間分布と数値解析の比較結果を示す。これより衝撃波背後で電子温度の計算値は実験と良い一致を示しているのが確認できる。一方で電子密度に関しては、実験値は計算値よりも一桁高いオーダーとなっており、今後より多くの電子が衝撃波直後で生成されるようにプリカーサモデルを改良する必要があることが分かった。

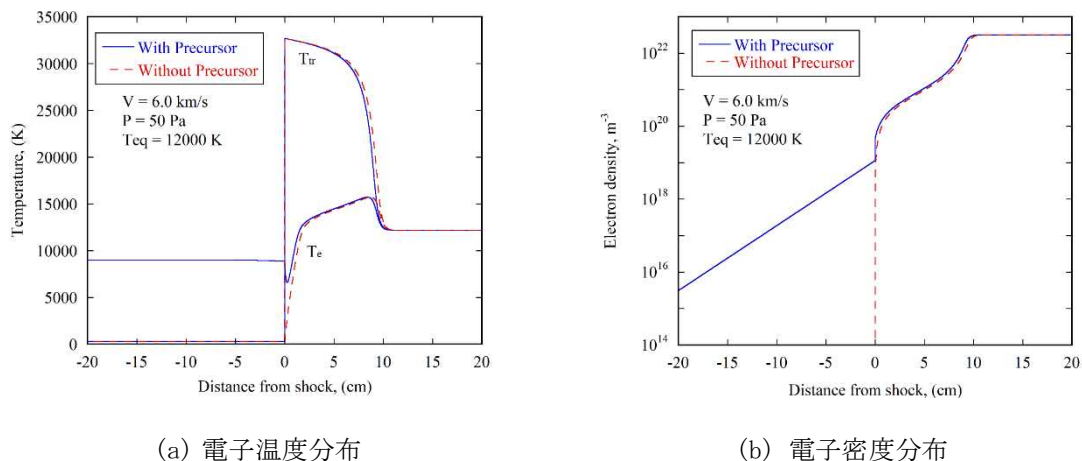


図4 プリカーサモデルを考慮した CFD 解析結果

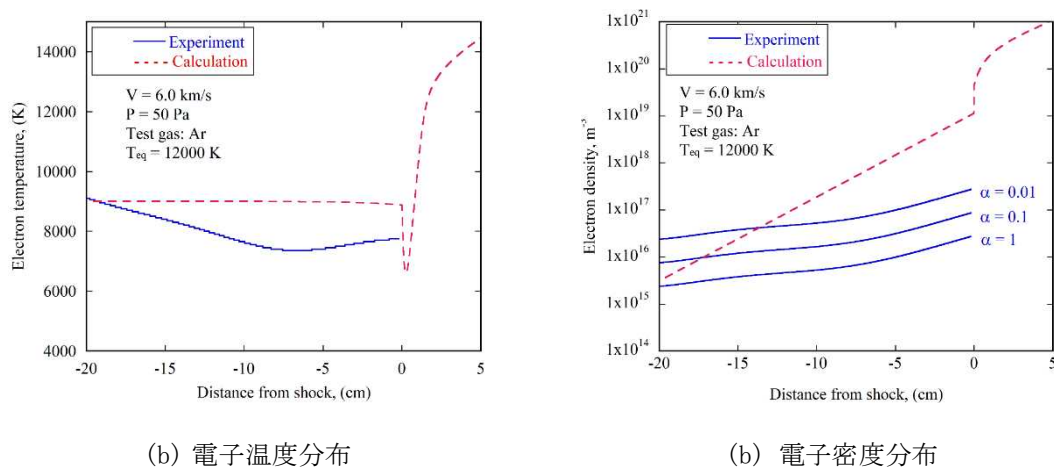


図5 衝撃波前方領域の実験と CFD の比較結果

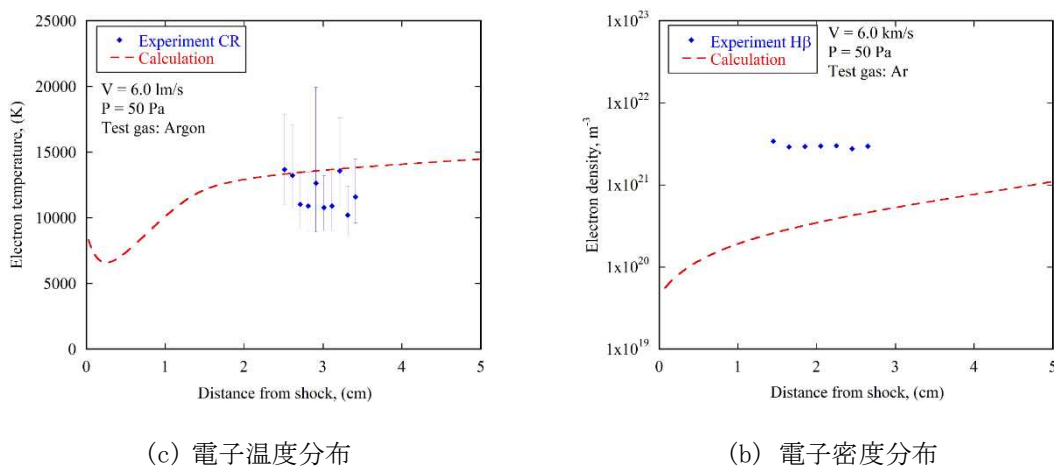


図6 衝撃波後方領域の実験と CFD の比較結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Kawazoe, G. Yamada, K. Sakamoto	4. 巻 Vol. 43C
2. 論文標題 Precursor phenomena ahead of a re-entry vehicle into Earth atmosphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 46th EPS Conference on Plasma Physics (EPS2019)	6. 最初と最後の頁 1184-1187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamada, G., Kajino, M., and Kawazoe, H.	4. 巻 AIAA2019-1350
2. 論文標題 Nonequilibrium Radiation of Shock-heated Plasmas with Precursor phenomena	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIAA Scitech 2019 Forum	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2514/6.2019-1350	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamada, G., Kajino, M., and Kawazoe, H.	4. 巻 Vol. 42A
2. 論文標題 Internal energy relaxation processes of nitrogen plasmas at different electronic states in an entry flight condition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 45th EPS Conference on Plasma Physics (EPS2018)	6. 最初と最後の頁 1348-1351
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yamada, G., Kajino, M. and Kawazoe, H.
2. 発表標題 Nonequilibrium Radiation of Shock-heated Plasmas with Precursor phenomena
3. 学会等名 AIAA Scitech 2019 Forum（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamada, G., Kajino, M. and Kawazoe, H.
2. 発表標題 Internal energy relaxation processes of nitrogen plasmas at different electronic states in an entry flight condition
3. 学会等名 45th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤佑都、松下 昂、山田剛治、坂本憲一、川添博光
2. 発表標題 自由ピストン駆動型衝撃波管によるプリカーサ現象の実験・検証
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松下 昂、後藤佑都、坂本憲一、山田剛治、川添博光
2. 発表標題 自由ピストン駆動型衝撃波管を用いた衝撃波前方領域におけるトリプルプローブによるプリカーサ放射加熱の実証
3. 学会等名 第56回日本航空宇宙学会 関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kawazoe, G. Yamada and K. Sakamoto
2. 発表標題 Precursor phenomena ahead of a re-entry vehicle into Earth atmosphere
3. 学会等名 46th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

オーストラリアクィーンズランド大学が所有する膨張波管X2で生成した2次元楔型模型周りのアルゴン電離流れに関する研究を実施した。模型周りの流れ場についてイメージング分光計測を実施し、計測したアルゴンスペクトルから電子励起温度を評価したところ、衝撃波直後で数値予測よりも著しく高くなることが分かった。衝撃波前方領域での発光も確認できており、プリカーサ現象による影響であると考えられる。現在、引き続き詳細な流れ場の解析とプリカーサモデルの開発に向けた数値解析コードの改良を共同研究として実施している。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山田 剛治 (YAMADA Goji) (90588831)	東海大学・工学部・准教授 (32644)	
連携研究者	酒井 武治 (SAKAI Takeharu) (90323047)	鳥取大学・工学部・教授 (15101)	