

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820411

研究課題名(和文) 衝撃波前方のプリカーサ電子が衝撃波背後の熱化学的非平衡過程に及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) Research on the influence of precursor electrons ahead of a shock wave on the thermochemical nonequilibrium process behind the shock wave.

研究代表者

山田 剛治 (YAMADA, GOUJI)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90588831

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：トリプルプローブ計測より、衝撃波前方のプリカーサ電子の存在を確認し、理論解析との比較からそれらの生成過程が光電離反応であることを解明した。また衝撃波背後の輻射光の分光計測を実施して、計測した水素のバルマー線のシュタルク広がりから電子密度分布特性を取得した。その結果、衝撃波後方で輻射エネルギー損失が生じることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The presence of precursor electrons ahead of a shock wave was confirmed by the triple-probe measurement. The generation mechanism of precursor electrons is found to be the photoionization reaction from the comparison with a theoretical analysis. In addition, spectroscopic measurements were conducted to measure the radiation behind a shock wave and the electron density distribution was obtained by evaluating the stark broadening of hydrogen Barmer line. As a result, it is found that the radiative energy loss occurs in the region behind the shock wave.

研究分野：非平衡気体力学、分光学

キーワード：衝撃波 アルゴン 光電離反応 電離過程 プリカーサ現象 シュタルク効果 電子密度 電子温度

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様々な惑星探査ミッションが世界各国で計画されている。これらの惑星探査ミッションを実現するための重要課題として大気圏突入飛行技術の向上が挙げられる。宇宙機が大気圏突入飛行する際には強い離脱衝撃波が生じ、機体表面は厳しい空力加熱にさらされる。このような空力加熱は機体まわりで生じる熱的緩和過程や解離、電離、再結合反応における非平衡過程に強い影響を受けるために、機体の空力設計及び熱防御システムを開発するためには、熱化学的非平衡過程を正確に予測する必要がある。そこで熱化学的非平衡過程を予測するいくつかの熱化学モデルが開発され、機体設計に利用されてきた。しかしながらモデルに含まれる不確実性が大きいために、過大な安全率を課した設計を余儀なくされており、システムの重量増加や開発コスト増加の要因となっている。

申請者はこれまでに熱化学モデルの検証・改善を目的として衝撃波背後の輻射光の光学診断を行ってきた。その結果、衝撃波直後の非平衡領域において電子励起温度の計測値がモデルの予測値と大きく異なることが明らかになった。この原因を解明するために電子・電子励起温度の非平衡過程を考慮した3温度モデルを用いて数値解析を行ったところ、衝撃波前方領域において電子生成を仮定することにより実験値を再現できることがわかった。この結果は衝撃波前方で生成される電子(プリカーサ電子)の存在が衝撃波背後の熱化学的非平衡過程に影響を及ぼすことを示唆している。プリカーサ電子は衝撃波後方領域からの紫外放射に誘起される光電離反応及び電子拡散によって生成されると考えられている。しかしながら衝撃波前方領域に着目した研究は非常に少なく、プリカーサ電子の生成メカニズム及びそれらが衝撃波背後の熱化学的非平衡過程にどのような影響を及ぼすのか解明されていない。

2. 研究の目的

そこで本研究課題は衝撃波前方で生成されるプリカーサ電子に着目し、プリカーサ電子が衝撃波背後の熱化学的非平衡過程に及ぼす影響を解明することを目的とする。この目的を達成することで熱化学モデルの精度向上を目指す。

3. 研究の方法

アルゴンを対象として、衝撃波前方領域のトリプルプローブ計測及び衝撃波背後の輻射光の極短時間分光計測を利用して衝撃波前後の電離過程について調べた。

4. 研究成果

(1) 衝撃波前方のプリカーサ電子の生成機構の解明

アルゴン気体中に生成したマッハ数 18 の

衝撃波前方領域において、トリプルプローブ計測よりプリカーサ電子の電子状態の計測に成功した。またプリカーサ電子の生成メカニズムを解明するために、発光分光計測と1次元光電離モデルを用いた理論解析を実施した。図1、2にトリプルプローブ計測より取得したプリカーサ電子の空間分布特性をそれぞれ示す。図1より電子温度は8000K程度であり、衝撃波面からの位置によらずほぼ一定の値を示しているのがわかる。一方、図2より電子密度は衝撃波面に近づくにつれて指数関数的に増加しており、 $10^{15} \text{ m}^{-3}$  から  $10^{17} \text{ m}^{-3}$  の範囲にある。この結果、衝撃波前方では多数の電子が存在していることが明らかになった。また図1、2の破線は1次元光電離モデルを用いた解析結果を示している。本解析においては、プリカーサ電子は衝撃波背後の輻射光による光電離反応 ( $\text{Ar} + h\nu \rightarrow \text{Ar}^+ + e^-$ ) により生成されると仮定している。これより解析結果は実験結果と定性的に一致しているのがわかる。図3に発光分光計測より取得した、衝撃波前方におけるアルゴンイオン(波長 358nm)の発光強度を示す。これより、衝撃波前方 100mm 程度からアルゴンイオンの発光が確認でき、アルゴンイオンが生成されることがわかる。この結果は上述した光電離反応によりアルゴンイオンとプリカーサ電子が生成されることを示している。以上から、プリカーサ電子の生成メカニズムは衝撃波背後の輻射光をエネルギー源とする光電離反応であることを明らかにした。

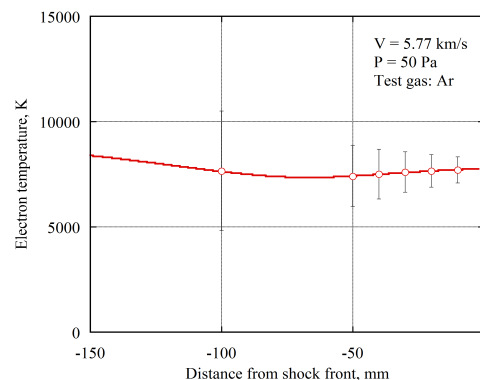


図1 プリカーサ電子の電子温度分布

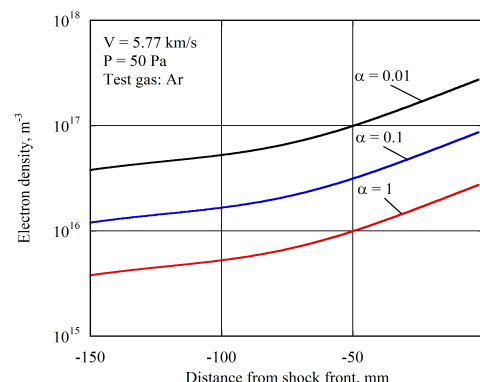


図2 プリカーサ電子の電子密度分布

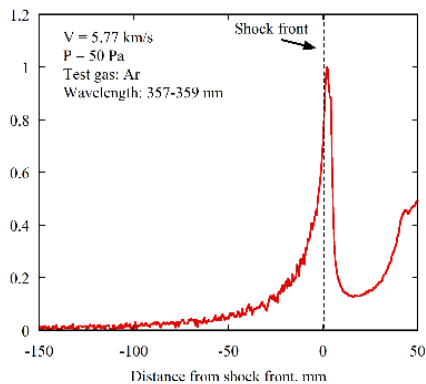


図3 アルゴンイオンの発光特性

## (2) 衝撃波背後の電子密度分布計測

衝撃波面から 30mm の位置で計測した発光スペクトルを図 4 に示す。波長範囲 400 ~ 430nm 付近にはアルゴン原子スペクトルが観測されているのがわかる。また波長 486nm 付近には、水素原子のバルマー線が明瞭に観測されており他の化学種からの発光による影響が少ないのが分かる。本研究では、計測したバルマー線のシュタルク広がりを評価して電子密度を取得した。ここで他の要因によるスペクトル広がりと比較することにより、本実験条件においてはシュタルク広がり装置広がり支配的であることがわかった。そこで本研究では、装置広がり考慮して計測したバルマー線のシュタルク広がりを評価して、電子密度を取得した。

図 5 に衝撃波背後の電子密度の空間分布特性を示す。図中の実線は、CFD による計算結果を示している。計測した電子密度のオーダーは  $10^{21} \text{ m}^{-3}$  であり、衝撃波面から離れるにつれて減少する傾向にあるのが分かる。一方で、電子密度の計算結果は実験値大きい値を示し、増加傾向にあることが分かる。これは今回行った CFD 解析では輻射輸送を考慮していないためであると考えられる。しかしながら輻射輸送を考慮していないにも関わらず、実験値と計算値の差異は一桁以内となっており、バルマー線による電子密度の評価が妥当であることを示している。実験値で確認された電子密度の減少は、衝撃波背後の試験気体からの輻射エネルギー損失によるものであると考えられる。輻射エネルギー損失は、試験気体の温度あるいは密度の減少に対応しており、結果として電子密度の減少を生じさせる。申請者らが行った過去の研究から、アルゴン衝撃波前方のプリカーサ電子は衝撃波背後の輻射光をエネルギー源とする光電離反応により生成される。よって本研究で取得した電子密度分布特性から衝撃波背後において輻射エネルギー損失が生じることが明らかになった。

以上研究項目(1),(2)より得られた結果は、今後の電離過程の高精度モデル化を行うための貴重なデータである。

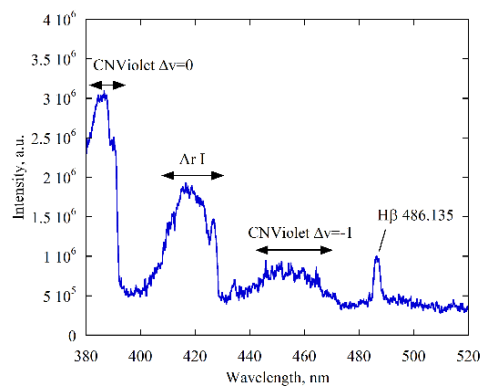


図4 衝撃波背後の発光スペクトル

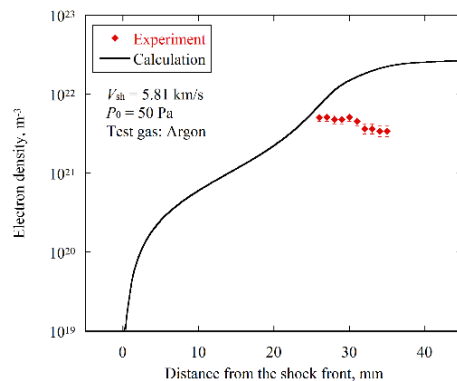


図5 衝撃波背後の電子密度分布特性

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 8 件)

- Yamada, G., Otsuta, S., Kawazoe, H., Temperature Evaluation of CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-Ar Plasma Flows Using the Area Intensity Method, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 12, 2015, pp.89-96, 査読あり
- Nishida, G., Yamada, G., Kawazoe, H., Spectroscopic Flow Evaluation of Nonequilibrium CO<sub>2</sub>-Ar Plasma Flow in an Arc-jet Facility, Journal of Materials and Metallurgy, Vol.14, No.1, 2015, pp.76-80, 査読あり
- Yamada, G., Ago, S., Kawazoe, H., Obayashi, S., Generation Mechanism of Precursor Electrons ahead of a Hypersonic Shock Wave in Argon, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.9, No.5, 2014, JFST0070, 査読あり
- Yamada, G., Imagawa, S., Inoue, K., Kawazoe, H., Obayashi, S., "Improvement of a Sensitivity-Adjustable Three-Component Force Balance and Its Application to Supersonic Wind Tunnel Testing," Journal of Fluid Science and

Technology, Vol.9, No.5, 2014, JFST0068, 査読あり

山田剛治, 大気突入飛翔体周りで生じる非平衡放射光の分光解析, 日本航空宇宙学会誌, 62 巻, 2014, pp.71, 査読あり

山田剛治, 惑星大気突入飛行に伴う極超音速プラズマ流に関する研究, 鳥取大学大学院工学研究科/工学部研究報告, 45 巻, 2014, 00.32-37, 査読なし

Yamada, G., Ago, S., Kubo, Y., Matsuno, T., Kawazoe, H., Development of a Shock Tube Facility for Nonequilibrium Radiation Studies in Mars Entry Flight Conditions, Journal of Space Engineering, Vol. 6, No. 1, 2013, pp. 28-43, 査読あり

Yamada, G., Otsuta, S., Matsuno, T., Kawazoe, H., Temperature Measurements of CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> Plasma Flows around a Blunt Body in an Arc-Heated Wind Tunnel, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 11, 2013, pp. 87-91, 査読あり

#### 〔学会発表〕(計 11 件)

山田剛治, 丸山隼平, 川添博光, 極超音速アルゴン衝撃波背後の電子密度計測, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎, 2014 年 11 月 13 日

Yamada, G., Maruyama, S., Kawazoe, H., Electron Density Measurements behind a Hypersonic Shock Wave in Argon, the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Oct. 9 (2014).

Yamada, G., Nishida, G., Nakanishi, M., Kawazoe, H., Optical Diagnostics of CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-Ar Plasma in the Hollow Electrode Arc Heater, the 11th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Oct. 9 (2014).

吾郷祥太, 山田剛治, 川添博光, アルゴン衝撃波に誘起されたプリカーサ電子の電子状態計測, 日本機械学会中国四国支部第 52 期総会講演会, 鳥取, 2014 年 3 月 7 日

山田剛治, 青山省吾, 川添博光, 火星探査に向けた展開型デルタ翼の高速空力特性, 平成 25 年度衝撃波シンポジウム, 相模原, 2014 年 3 月 6 日

Ago, S., Yamada, G., Setou, M., Kawazoe, H., Obayashi, S., Shock Tube Measurements of Precursor Radiation ahead of Hypersonic Shock Waves, the 13<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Nov. 26 (2013).

Imagawa, S., Inoue, K., Yamada, G., Kawazoe, H., Obayashi, S., Application of a Sensitivity-Adjustable Three Component Force Balance to a Silent Supersonic Biplane Model, the 13<sup>th</sup> International

Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Nov. 26 (2013).

吾郷祥太, 山田剛治, 川添博光, トリプルプローブ法を用いた衝撃波前方の電子状態計測, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 米子, 2013 年 10 月 10 日

久保優斗, 山田剛治, 川添博光, CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 大気衝撃波背後における CN 分子の熱化学特性, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 米子, 2013 年 10 月 10 日

山田剛治, 地球大気再突入環境を模擬した衝撃層放射光の分光解析, 日本航空宇宙学会第 44 期総会講演会, 本郷, 2013 年 4 月 19 日

山田剛治, 大藪信吾, 松野隆, 川添博光, バンドヘッド強度比を用いた二酸化炭素アークプラズマ流の温度評価, 日本航空宇宙学会第 44 期総会講演会, 本郷, 2013 年 4 月 18 日

#### 〔その他〕

特記事項なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山田 剛治 (YAMADA GOUJI)

鳥取大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 90588831