

大気圏突入氷天体アブレーションガスの化学反応に関する放電を利用した極超音速風洞実験

Hypersonic wind tunnel experiments on chemical reaction around an icy object with ablation using electric discharge

鈴木 宏二郎^{1*}, 渡邊保真²

SUZUKI, Kojiro^{1*}, WATANABE Yasumasa²

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ² 東京大学大学院工学系研究科

¹GSFS, The University of Tokyo, ²Grad. Sch. Eng., The University of Tokyo

惑星大気圏に突入する天体前方には強い衝撃波が発生し、その背後の高温衝撃層では、大気成分と天体表面からのアブレーションガスが反応して生命前駆物質を含む様々な化学種が生成されると考えられる。それらは、突入天体の後流を経て惑星大気に供給されることになる。その検討のため、表面でH₂Oのアブレーションガス噴出を伴う氷天体が、原始地球を想定したN₂-CO₂大気中を極超音速で飛行する際の化学反応流れについて、Navier-Stokes方程式による数値解析を行った (Suzuki, AIAA Paper 2011-3756)。28化学種 (N₂, O₂, N, O, NO, NO⁺, e⁻, N⁺, O⁺, N₂⁺, O₂⁺, C, C₂, C₃, CO₂, CO, CN, CO⁺, C⁺, H, H₂, HCN, HCO, C₂H₂, C₂H, CH, H₂O, OH) の非平衡化学反応を考慮し、熱的非平衡性については振動モードを並進モードと分離した2温度モデルを用いている。なお、これはCFRPアブレータを持つHayabusa回収カプセルまわりのN₂-O₂大気圏再突入化学反応流解析用に開発した計算コードを基礎としている。計算結果から、氷天体前方にできる強い衝撃波の背後で生成されたCNが、アブレーションガスの分解で供給されるH₂と反応することにより、淀み点領域の表面近傍でHCNを生成し、それが、肩部での急膨張流れを経て、ほぼ凍結状態のまま後流から流出されることがわかった。大気成分をCO₂:N₂=0.93:0.07とし、現在の地球大気密度相当で高度60kmを速度8km/sで飛行する半径0.2mの氷球の風上側表面から一様に0.05kg/s/m²のH₂Oアブレーションガスが噴き出すケースでは、放出されるH₂O重量に対し、0.01%のオーダーのHCNが生成される結果が得られている。

大気圏に突入する宇宙輸送機の研究開発に用いられる極超音速風洞は、大気圏突入天体まわりの高速気流を模擬し、アブレーションなどの現象を観察する装置としても有用である (鈴木他, JpGU Meeting 2010, PPS004-10, 同 2011, PPS020-22, Imamura et al., AIAA Paper 2010-4512)。上述のように、極超音速流は衝撃波による急加熱や圧縮、膨張流による急冷却など非平衡性を生む環境に富み、様々な物質を生み出す化学反応炉として働いていると考えられる。しかし、極超音速風洞では設備の耐熱性の制約から化学反応が励起されるレベルの高温気流を作り出すことはできない。そこで、気流中に置く供試体に電極を設置し、放電による熱エネルギー注入 (Watanabe, Suzuki, AIAA Paper 2011-3736) を行うことを考える。実験は東京大学大学院新領域創成科学研究科が所有する極超音速高エンタルピー風洞 (http://daedalus.k.u-tokyo.ac.jp/wt/wt_index.htm) で行われた。図はテストケースとして行った平板での実験結果である。平板上には放電電極に加え、あらかじめ氷を張ったキャビティを置くことで、そこからのアブレーションガスを原料とする極超音速気流中の化学反応を観察できる。これは波長382 ± 2nmのナローバンドパスフィルターを介した高速ビデオ画像 (露光時間1ms) であり、この中にCNの発光帯が含まれている。気流の淀み点温度は約600K、平板上の気流静圧は約300Paである。放電は、点火時に5kVの高電圧を要するが、その後、5Vで6Aの定常放電が約1秒持続する。別途行ったN₂(1+)バンドの発光分光結果に対するフィッティングによると、放電部の中央では振動温度が約6000Kと見積られている。この図から気流中でのCN生成が確認されたが、Cは平板の材料であるベークライトの熱損耗から、Nは大気から供給されている。供試体の材質をアブレーションのないセラミックに変更し、アブレーション源として水の氷とドライアイスの混合物を用いることで、アブレーションガス中のCやHを原料とした化学種生成過程を観察できる。極超音速風洞と放電との組み合わせでは、気流や投入パワーなどの諸条件がわかっており、かつ、時間スケールも秒単位と比較的長い。計測や観測がしやすいというメリットを持つ。今後、大気圏突入天体まわりの化学反応模擬や数値解析の検証用データ取得に有用となるものと期待される。

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B) No. 21360413) の支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

キーワード: 大気圏突入, 極超音速流れ, 風洞, アブレーション, 氷, 化学反応

Keywords: atmospheric entry, hypersonic flow, wind tunnel, ablation, ice, chemical reaction

