

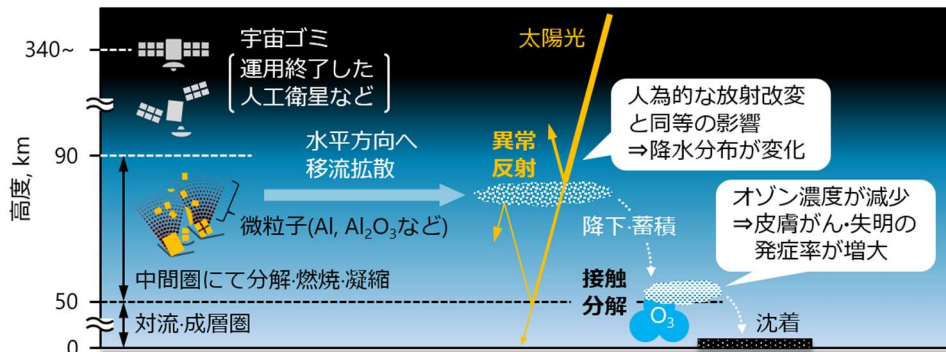
宇宙開発に伴う大気汚染評価
Investigation of Air Pollution Associated with Space Developments

市原大輔、名古屋大学・大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

【作成要領】

研究の目的

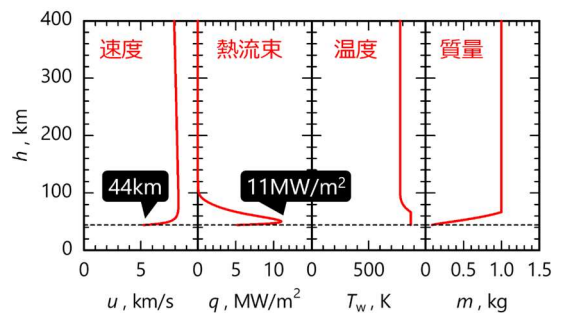
低軌道衛星からの太陽反射光が天文観測の妨げになることをめぐる最近の議論は、宇宙システムを構築する上で持続可能性を考慮する必要性を強く示唆している。特に数万機の低軌道衛星からなるメガコンステレーション計画では使用済み衛星の大気圏再突入過程においてアルミ(Al)やアルミナ(Al_2O_3)を主成分とする大量の微粒子が年間 2000 トン以上発生する。これは自然起源宇宙塵の年間飛来量 5000 トン(J. Rojas et al, *Earth Planet Sc. Lett.* **560**, 116794 (2021))に対して 40%に相当し、高高度大気(中間成層圏)が汚染される可能性が高い(A. C. Boley et al., *Sci. Rep.* **11**, 10642 (2021))。発生した微粒子は浮遊・降下しながら移流拡散し太陽光の異常反射やオゾン(O_3)層との相互作用を通じて地球大気の化学・力学・放射特性に不可逆的な変化を引き起こす(下図参照)。これは気候工学における人為的な放射改変と同等の影響をもたらす。将来世代の気候危機が高まる懸念が大きい(M. N. Ross et al., *Sci. AM.* Feb (2021))。したがって、宇宙産業の持続可能性を高めるべく環境負荷を考慮した適切な国際規制を制定するためには、宇宙ゴミの最終処分時に排出される微粒子及び地球大気への影響に係る基礎データの取得と環境影響評価とが必要である。宇宙ゴミの大気圏再突入手法に関する研究は国内外にてこれまで精力的に実施されてきたが、本研究では再突入による宇宙ゴミの焼却処分そのものが地球大気に及ぼす影響の解明に取り組む。



研究概要図

研究成果の概要

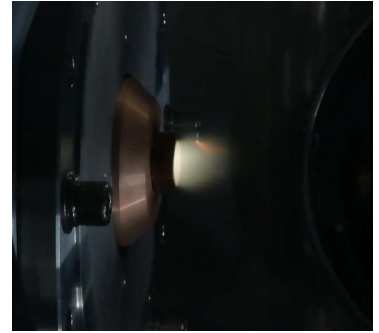
今年度はスケールモデル実験に必要な大気圏再突入時の空力加熱環境を模擬可能な小型高エンタルピー風洞の製作に注力した。高エンタルピー風洞の最重要設計要点として供試体への熱流束が挙げられる。風洞の仕様を決定すべく運動量・エネルギー保存測に基づいて、1U サイズ(10cm×10cm×10cm)の超小型衛星(質量 1kg)が高度 400km から垂直落下する状況を想定した数値計算を実施した。大気データには全地球標準大気モデルの 1 つである NRLMSISE-00 を用いた。各高度における再突入体の速度、熱流束、表面温度、質量の変化を右図に示す。高度 100km 付近までは大気密度が低いことから空気抵抗に伴う減速及び空力加熱による物体表面の温度上昇は見られず、むしろ重力加速を受け物体の落下速度は向上する。しかしながら高度 100km 未満では大気抵抗による空力加熱が徐々に始まり高度 50km 付近にて熱流束は最大 $11MW/m^2$ に達した。これに伴って表面温度が物体の昇華温度を上回り、物体の質量が減少し始める。最終的には高度 44km において燃え尽きるものと予測された。本数値計算結果に基づき、高エンタルピー風洞にお



高度 400km から自由落下する小型衛星の速度、熱流束、温度、質量履歴

る目標熱流束を $10\text{MW}/\text{m}^2$ と定めた。

続いて、上記熱流束の達成に必要なプラズマ源を設計し作動試験を行った。圧縮性流体におけるチョーク条件を考慮し、スロート径 3.0mm 、ノズル出口径 20mm 、半頂角 15 度、設計 Mach 数 5.7 の銅製ラバールノズルも作成した。圧縮空気を作動ガスとすることから電極の酸化が想定される。そこで、市販のプラズマ切断機にも採用されるハフニウム製陰極を用いた。上記再突入計算に基づく、再突入環境における空力加熱は高度 $40\text{-}100\text{km}$ にて生じる。この時の大気圧は $30\text{mPa}\text{-}300\text{Pa}$ と 4 桁にわたって変化する。実験時の雰囲気圧を模擬すべく、直径 1m 、長さ 3m の真空チャンバー端部に前述のプラズマ源を設置し本研究にて新規に購入したドライポンプで減圧しつつ、コンプレッサーから圧縮空気を最大 50slm 供給した。市販のプラズマ切断機用電源 A-70(株式会社ダイヘン製)を用い、放電電流は 15A に設定した。作動試験としてまずは大気圧下にて生成した高速プラズマ気流の写真を右図に示す。窒素特有の黄色く発光する大気圧プラズマがノズル出口から約 20mm にわたって発生していることが確認できる。圧縮空気の供給量を $20\text{-}50\text{slm}$ の範囲で変化させると放電電圧は $120\text{-}160\text{V}$ にわたって変化した。これにより作成したプラズマ源にて作動ガス流量、即ち物体への熱流束と雰囲気圧とを変化させつつ再突入に伴う空力加熱を部分的に模擬できる高エンタルピー風洞を試作することができた。今後は本風洞にて再突入体を模したアルミ球を実際に加熱し、アブレーションに伴って発生した金属微粒子を捕集・解析する予定である。



試作したプラズマ源の作動試験